

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstava i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Anto Čabraja

ZAGREB, 2013.

IZJAVA

Pod punom moralnom odgovornošću izjavljujem, da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno, pri čemu sam koristio stručne savjete svog mentora prof. dr. sc. Željka Šituma, kao i navedenu literaturu.

Anto Čabraja

ZAGREB, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANTO ČABRAJA**

Mat. br.: 35981313

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE I IZRADA NASTAVNE MAKETE ZA REGULACIJU PNEUMATSKIH SUSTAVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DESIGN AND MANUFACTURING OF A DIDACTIC MODEL FOR PNEUMATIC SYSTEMS CONTROL**

Opis zadatka:

Automatska regulacija spada u skupinu prilično apstraktnih i teorijski zahtjevnih inženjerskih kolegija, te stoga praktična demonstracija različitih metoda i postupaka regulacije na realnim fizičkim sustavima pomaže studentima za bolje razumjevanje nastavnog gradiva. S druge pak strane, pneumatski sustavi široko se koriste u industriji u sprezi s jeftinim elektromagnetskim ventilima, kojima se ostvaruju jednostavne operacije premještanja predmeta (engl. 'pick and place'). Razvoj elektropneumatike u novije vrijeme rezultirao je novom klasom relativno skupih proporcionalnih, elektronički upravljanih servopneumatskih sustava, čime se omogućuje ostvarenje zadataka fleksibilnog, brzog i preciznog pozicioniranja pneumatskih pogona. Stoga bi sa stanovišta nastavnog procesa didaktička maketa za demonstraciju načina rada elektromagnetskih i proporcionalnih ventila, te objašnjenje procesa upravljanja (otvoreni krug) i regulacije sustava (zatvoreni krug) bila vrijedno nastavno pomagalo u cilju boljeg razumjevanja postupaka automatizacije sustava.

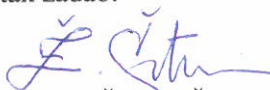
U zadatku je potrebno:

- projektirati i izraditi edukacijsku maketu za demonstraciju načina rada elektromagnetskih i proporcionalnih ventila, te značajki procesa upravljanja i regulacije sustava,
- dati tehnički opis korištenih komponenti pri izradi edukacijske makete,
- načiniti sintezu regulatora i izvršiti simulaciju procesa,
- razvijene upravljačke algoritme ispitati na eksperimentalnom postavu, te objasniti i dokumentirati dobivene rezultate.

Zadatak zadan:

2. svibnja 2013.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Željko Šitum

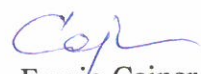
Rok predaje rada:

4. srpnja 2013.

Predviđeni datum obrane:

10., 11. i 12. srpnja 2013.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu na savjetima i uvijek slobodnom te nesebičnom vremenu pri pomoći izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Danijelu Pavkoviću na brojnim korisnim stručnim raspravama i savjetima.

Zahvaljujem kolegama sa Katedre za strojarsku automatiku na suradnji i pomoći pri stjecanju novih znanja.

Posebno se zahvaljujem obitelji što su mi omogućili studiranje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje kao i na pruženoj podršci.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu izrađena je nastavna maketa koja će pomoći za bolje razumjevanje regulacije i upravljanja pneumatskim sustavima.

U prvom i drugom poglavlju su objašnjeni načini upravljanja pneumatskih sustava pomoću proporcionalnih ventila i elektromagnetskih dvopoložajnih ventila.

Nakon toga slijedi određivanje dinamičkog modela sustava koji će preko matematičkog opisa rezultirati prijenosnom funkcijom sustava.

Pneumatski sustav će se prikazati kao blok dijagram (simulacijska shema) te simulirati ponašanje za zadane ulazne veličine nakon što su definirani svi potrebni parametri i izrađen dinamički model pneumatskog sustava.

Za tu svrhu koristi se programski paket MATLAB i program za izradu simulacijskih modela SIMULINK.

Poslije izrade projektne makete slijedi izvođenje eksperimenta regulacijom pomoću proporcionalnog ventila. U zadatku je trebalo izvesti i eksperiment pomoću elektromagnetskih dvopoložajnih ventila ali zbog kratkog vremena eksperiment nije načinjen.

Načinjena je usporedba dobivenih simulacijskih i eksperimentalnih rezultata, te su prikazani u grafičkom obliku.

SADRŽAJ

Popis slika i tablica

Popis oznaka

1. UVOD	1
2. NAČIN UPRAVLJANJA PNEUMATSKIM POGONIMA	2
2.1. Pneumatski pogon upravljan proporcionalnim ventilom.....	2
2. 2. Pneumatski pogon upravljan elektromagnetskim ventilom	8
2. 2.1. Princip rada elektromagnetskih ventila	9
2. 3. Metoda dvopoložajne regulacije pneumatskih cilindara.....	11
2. 4. Trenje cilindra	15
3. DINAMIČKI MODEL	17
3. 1. Dinamički model pneumatskog sustava upravljanog proporcionalnim ventilom	18
3. 2. Dinamički model pneumatskog procesa.....	19
4. SIMULACIJA PROCESA	22
4. 1. Blokovski prikaz reguliranog sustava.....	22
4. 2 . Simulacija procesa upravljanog proporcionalnim ventilom.....	24
5. PROJEKTIRANJE NASTAVNE MAKETE	28
6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI.....	32
7. ZAKLJUČAK	37
Literatura.....	38
Prilog	

Popis slika i tablica

Slika 2. 1. Shematski prikaz pneumatskog cilindra bez klipnjače upravljano proporcionalnim 5/3 ventilom.....	3
Slika 2 . 2. Shematski prikaz rada proporcionalnog 5/3 ventil.....	4
Slika 2. 3. Zavisnost nominalnog protoka od iznosa napona (prema katalogu proizvođača).....	5
Slika 2. 4. Određivanje vremena reakcije proporcionalnog ventila na temelju prijelazne funkcije tlaka	7
Slika 2. 5. Shematski prikaz pneumatskog cilindra bez klipnjače upravljano elektromagnetskom dvopoložajnim ventilima	9
Slika 2. 6. Konstrukcijska izvedba direktno upravljano elektromagnetskog ventila SMC EVT – 307	10
Slika 2. 7. Realizacija regulacijskog kruga pneumatskog cilindra upravljano elektromagnetskim ventilima metodom dvopoložajne regulacije	11
Slika 2. 8. Blok dijagram ventila predstavljenog kao idealna sklopka s mrtvim vremenom	12
Slika 2. 9. Ponašanje pneumatskog sustava pri dvopoložajnoj regulaciji	13
Slika 2. 10. Statički modeli trenja	16
Slika 3. 1. Blok dijagram regulacijskog procesa	20
Slika 4. 1. a) Strukturna blokovska shema digitalnog kruga regulacije položaja.....	22
b) Nadomjesni kontinuirani regulacijski krug položaja	22
Slika 4. 2. Simulacijski model cijevi u programu MATLAB	25
Tablica 4. 3. Parametri sustava korišteni u simulacijskom modelu	26
Slika 4. 4. Simulacijski rezultati odziva na skokovitu promjenu reference.....	27
Slika 4. 5. Simulacijski rezultati odziva na skokovitu promjen.....	27
Slika 5. 1. Pneumatski sustav upravljano proporcionalnim 5/3 ventilom.....	28
Slika 5. 2. Karakteristika senzora GP2D12 udaljenosti i napona	30
Slika 5. 3. Fotografija laboratorijskog modela reguliranog pneumatskog sustava ...	31

Slika 6. 1. Regulacija položaja loptice, eksperimentalni odziv.....	33
Slika 6. 2. Regulacija položaja lopotice eksperimentalni odziv $K_p=1$, $K_d=0.075$	34
Slika 6. 3. Regulacija položaja loptice eksperimentalni odziv $K_p=4$, $K_d=0.01$	35
Slika 6. 4. Regulacija položaja lopotice eksperimentalni odziv $K_p=10$, $K_d=0.075$	36

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina cijevi
A_{ef}	m^2	Površina loptice
A_v	mm^2	Efektivna površina strujanja zraka kroz ventil
A_o	-	Amplituda osciliranja
C_v	-	Konstanta proporcionalnosti
δ_s	-	Eksponent koji se uzima kao $\delta_s = 2$
F_s	N	Sila statičkog trenja
h	m	Visina loptice
h_R	m	Referentna visina
\dot{h}	m/s	Brzina loptice
\ddot{h}	m/s^2	Ubrzanje loptice
i	A	Jakost električne struje
k_f	Ns/m	Koeficijent viskoznog trenja
K_i	m/V	Koeficijent pojačanja struje
Kot	Ns/m	Koeficijent trenja
K_v	m/V	Koeficijent ventila
m_L	kg	Masa loptice
Op	m^3	Optok oko loptice
p	Pa	Tlak idealnog plina
Pat	Pa	Atmosferski tlak
p_c	Pa	Tlak u cijevi
Po	Pa	Tlak napajanja
q	kg/m^3	Gustoća komprimiranog zraka
q_v	m^3/s	Volumenski protok ventila

R	J/kg K	Plinska konstanta
R_n	Ω	Otpor namotaja elektromagneta
T	K	Temperatura
T_m	ms	Mrtvo vrijeme
T_s	ms	Vrijeme otvaranja ventila
T_v	s	Derivacijska vremenska konstanta
T_ω	ms	Period osciliranja
u	V	Izlazni napon servopojačala
V	m ³	Volumen cijevi
$x_s = D_v$	-	Stribeck-ova brzina
$x(t)$	mm	Pomak loptice
$w(t)$	V	Vodeća veličina
W_{in}	kg/s	Maseni protok na ulazu cijevi
W_{out}	kg/s	Maseni protok gubitka

1. UVOD

Upravljeni pneumatski pogoni široko se primjenjuju u najrazličitijim sustavima industrijske automatizacije. Prilikom regulacije, pneumatski sustavi koriste stlačeni zrak koji je upravljan preko pneumatskih ventila. Pneumatski ventili se danas najviše koriste u sustavima u svrhu pozicioniranja, a sve se više pažnje posvećuje njihovoj brzini, točnosti te samoj masi.

Pneumatske ventile koje možemo koristiti u zadacima pozicioniranja pneumatskih pogona dijelimo u tri osnovne skupine:

- proporcionalni ventili,
- proporcionalni tlačni ventili i
- elektromagnetski dvopoložajni ventili.

Cilj ovog rada je da se izradi nastavna maketa koja će poslužiti za objašnjenje rada pneumatskih pogona, te za dobivanje eksperimentalnih rezultata primjenom tih osnovnih skupina pneumatskih ventila. Koliko je dobro vođen sustav pokazat će eksperimentalni rezultati. Loše reguliran proces neće davati dobre rezultate tijekom regulacije.

U prvom i drugom poglavlju je objašnjeno kako funkcioniraju pneumatski ventili, koje su im karakteristike, tehničke osobine te različite izvedbe. Problem nastaje kada je model sustava nepoznat ili je toliko složen da se preko matematičkih modela teško rješava. U tim slučajevima takvi sustavi upravljaju se iskustveno, na osnovi skupljenog znanja iz statičkih i dinamičkih svojstva sustava kojim se upravlja.

U trećem poglavlju dano je objašnjenje dinamičkog modela po kojem će se izvesti simulacija u programu Matlab – Simulink. Dinamički sustav se aproksimira sustavom trećeg reda, grafički se prikazuje struktura regulacijskog kruga, izvode se sve prijenosne funkcije u kontinuiranom području potrebne za regulacijski krug.

Pomoću simulacijskih shema napravljenih u Matlab – Simulinku radi se sinteza sustava u simulacijskom području. Programi potrebni za izvršavanje algoritma (programa) napravljeni su pomoću Matlab – Real–Time–Workshop programa.

2. NAČINI UPRAVLJANJA PNEUMATSKIM POGONOM

Pneumatski sustavi za ostvarivanje reguliranog gibanja koriste se visokim razinama energije stlačenog zraka upravljane ventilima. Ventili pneumatskih servosustava koriste niskoenergetske električne signale za upravljanje i dijele se na tri osnovne vrste:

- proporcionalni ventili,
- proporcionalni tlačni regulatori i
- elektromagnetski dvopoložajni ventili.

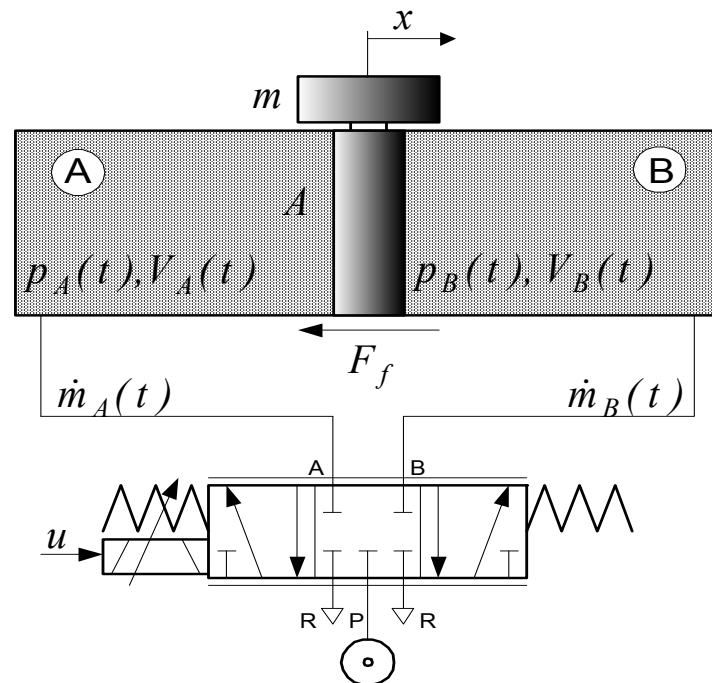
2. 1. Pneumatski pogon upravljan proporcionalnim ventilima

Pneumatski pogoni upravljani proporcionalnim ventilima u industrijskim mehatroničkim sustavima zauzimaju sve važniju ulogu te postaju alternativa električnim motorima za primjenu upravljanog gibanja. Uz razvoj novih tehnologija kontinuirano teže postizanju sve bržih odziva reguliranih veličina, visokoj točnosti pozicioniranja, mirnom i tihom radu i dr. [2]

Pneumatski proporcionalni ventili zbog sve učešćaje primjene u servosustavima često se nazivaju i pneumatski servoventili. Tehničke prednosti proporcionalnih uređaja su kontrolirani prijelazi između radnih položaja, kontinuirano upravljanje zadanom vrijednošću te smanjen broj pneumatskih komponenti.

Karakteristika proporcionalnih ventila je u tome što je maseni protok kroz ventil proporcionalan privedenom upravljačkom signalu. Proporcionalni ventili su regulirane komponente koje posjeduju internu povratnu vezu po poziciji razvodnog klipa a izvedeni su tako da kombiniraju prednosti pneumatike s prednostima elektronike kao što su fleksibilnost, preciznost, prijenos, obrada podataka itd. [3]

Privođenjem upravljačkog signala na elektromehanički pretvarač dolazi do pomaka ventila koje registrira senzor pomaka te šalje povratni signal u elektronički dio za reguliranje pomaka klipa ventila. [2]

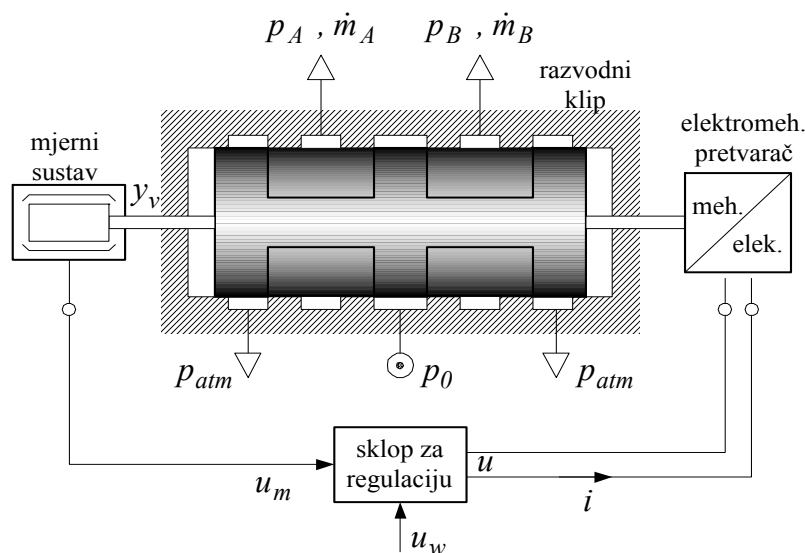


Slika 2. 1. Shematski prikaz pneumatskog cilindra bez klipnjače upravljanog proporcionalnim 5/3 ventilom

Integrirana elektronika formira upravljački signal kako bi se pomakom razvodnog klipa ventila dobio otvor strujanja, koji omogućuje maseni protok fluida proporcionalan privedenom upravljačkom signalu. [2]

Struktura proporcionalnog 5/3 ventila sastoji se od četiri osnovna dijela:

- elektromehanički pretvarač (elektromagnet),
- kućište ventila s razvodnim klipom,
- senzor za mjerenje pomaka razvodnog klipa ventila,
- analogni sklop za regulaciju pomaka klipa ventila (servopojačalo).



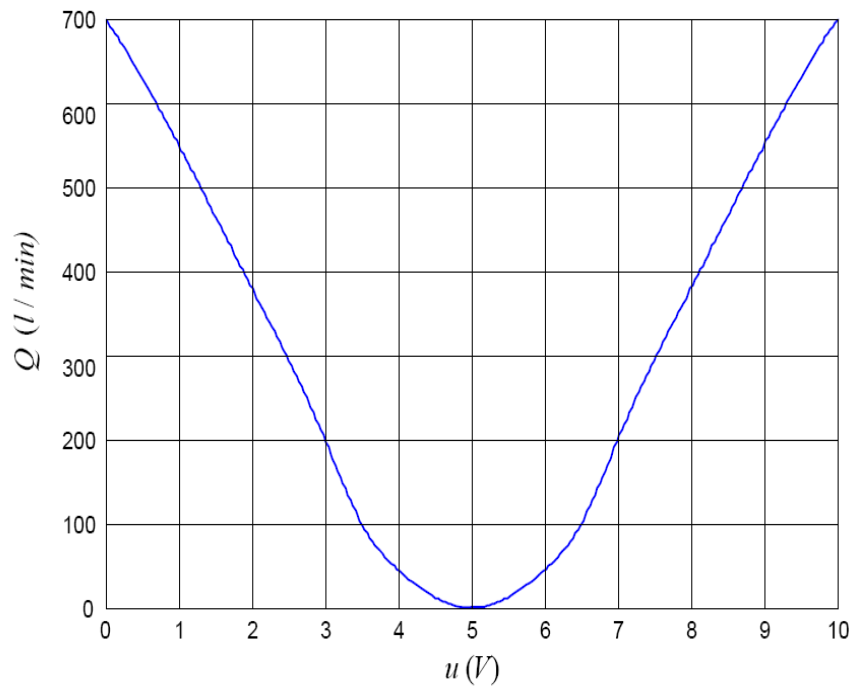
Slika 2. 2. Shematski prikaz rada proporcionalnog 5/3 ventila

Za potrebe pozicioniranja u automatiziranim industrijskim postrojenjima, proporcionalni ventili daju vrlo dobre rezultate i mogu se koristiti u gotovo svim granama tehnike u kojima se pokazala potreba za upravljanje servosustavima. Njihov najveći nedostatak je relativno visoka cijena te se često poseže za alternativnim, ali ne tako preciznim rješenjima poput elektromagnetskih dvopoložajnih ventila ili proporcionalnih tlačnih regulatora.

Slika 2. 3. prikazuje zavisnost nominalnog protoka od iznosa napona proporcionalnog ventila. Kako kod ovog pneumatskog sustava koristimo cijev, a ne klasični cilindar tako će i karakteristika biti od 0 – 5 V jer nam je potreban nominalni protok zraka samo u jednom smjeru propuštanja. Na slici 2. 3. prikazane su promjene nominalnog protoka zraka u komorama cilindra A_p i B_p (sl. 2.1), za promjenu upravljačkog signala napona od 0 do 10 V.

Ventil ima nulti (srednji) položaj za iznos upravljačkog signala napona od 5 V. Za iznos signala u rasponu 0 do 5 V pod tlakom je komora A, dok je komora B odzračena, pa se cilindar nalazi u desnom krajnjem položaju.

Kada iznos signala poraste preko 5 V omogućen je protok zraka prema komori B, dok se komora A odzračuje, pa se cilindar giba prema lijevom krajnjem položaju.



Slika 2. 3. Zavisnost nominalnog protoka od iznosa napona (prema katalogu proizvođača)

Protjecanje električne struje i kroz elektromehanički pretvarač opisuje slijedeća diferencijalna jednačina:

$$L_n \frac{di}{dt} + R_n i = u \quad (2 - 1)$$

gdje je:

L_n - induktivitet,

R_n - otpor namotaja elektromagneta,

u - izlazni napon servopojачala.

Laplace – ovom transformacijom izraza (2 – 1) dobiva se:

$$(L_n s + R_n) i(s) = u(s) \quad (2 - 2)$$

$$\frac{i(s)}{u(s)} = \frac{1}{L_n s + R_n} \quad (2 - 3)$$

Pretpostavlja se linearna zavisnost pomaka klipa ventila y_v i električne struje i kroz elektromehanički pretvarač, tj.

$$y_v = K_i u \quad (2 - 4)$$

gdje je K_i - koeficijent pojačanja struje.

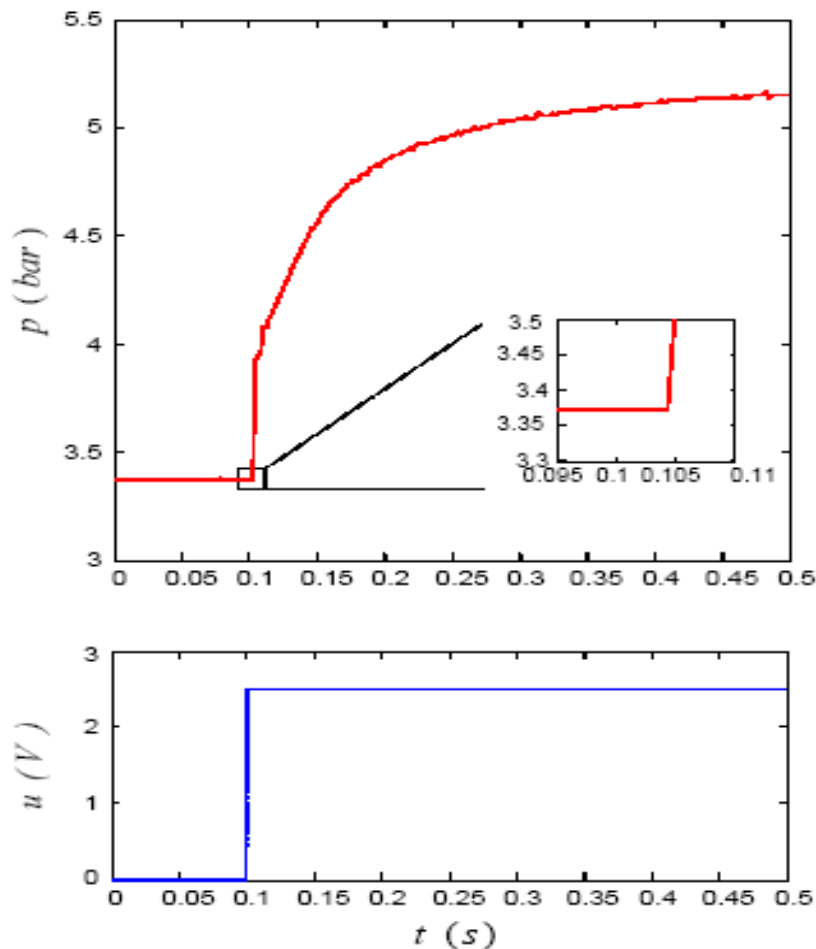
Ukoliko se može zanemariti induktivitet namotaja elektromagneta L_n u izrazu (2 – 1), tada se izraz (2 – 4) može pisati kao:

$$y_v = K_i \frac{u}{R_m} = C_v u \quad (2 - 5)$$

Dakle, pretpostavlja se trenutni odziv ventila na upravljački signal. Ovu pretpostavku potvrđuje i vrijeme reakcije proporcionalnog ventila na privedeni upravljački signal dobiveno na temelju snimanja prijelazne funkcije tlaka za srednji položaj cilindra, slika 2.4.

Kašnjenje odziva prijelazne karakteristike tlaka je oko 5 ms, a uključuje pored vremena reakcije ventila i vrijeme reakcije senzora tlaka. Vrijeme odziva proporcionalnog ventila (prema katalogu proizvođača) je 4.2 ms, a granična frekvencija je 120 Hz.

U izvedbama algoritama regulacije pneumatskog pogona vrijeme diskretizacije uobičajeno će se uzimati s iznosom $T=10$ ms. S obzirom na vrlo visoku vlastitu frekvenciju ventila, u simulacijskim shemama dinamika ventila bit će predstavljena konstantom C_v .



Slika 2. 4. Određivanje vremena reakcije proporcionalnog ventila na temelju prijelazne funkcije tlaka

2. 2. Pneumatski sustav upravljan elektromagnetskim dvopoložajnim ventilima

Elektromagnetski dvopoložajni ventili najjednostavnije su izvedbe od sva tri navedena modela što ih ujedno čine i najjeftinijim u grupi ali samim time i ograničenim u izvršavanju zadataka pozicioniranja, upravljanog gibanja i zadataka gdje je potrebna stabilnost i relativno dobra točnost. Često se koriste za upravljanje pneumatskih pogona

u automatiziranim industrijskim postrojenjima zbog svojih dobrih osobina kao što su visoka pouzdanost, niska potrošnja energije, sigurnost od preopterećenja, lakoća održavanja i dr.

Razvojem i primjenom novih umjetnih materijala za izvedbu pojedinih komponenata ventila kao i pomoćne funkcije kao što je npr. regulator snage, smanjuju inercijske učinke pomičnih elemenata ventila što omogućuje kraće vrijeme odziva ventila.

Ubrzanim razvojem pneumatskih komponenata i računalne tehnike a u cilju redukcije cijene proporcionalnih ventila zamjetan je intenzivan razvoj u području kvazikontinuirane regulacije pneumatskih pogona pomoću elektromagnetskih ventila. [2]

Osnovne izvedbe elektromagnetskih ventila s obzirom na način upravljanja su:

- elektromagnetski ventili s neposrednim upravljanjem (direktno upravljani ventili),
- elektromagnetski ventili s posrednim upravljanjem (predupravljani ventili).

Direktno upravljani ventili

Dovođenjem električnog signala na izvode ventila kod direktno upravljanih ventila te prolaskom struje kroz namotaj stvara se magnetska sila proporcionalna iznosu struje. Ukoliko je magnetska sila veća od namještene sile opruge ventila ostvaruje se pomicanje kotve elektromagneta čime se omogućava prolaz zraka prema izvršnom elementu. Ovaj način upravljanja primjenjuje se kod zahtjeva za malim protokom zraka (ventili s manjim nazivnim promjerom) jer se u protivnom javlja potreba za većim elektromagnetima. [2]

Predupravljani ventili

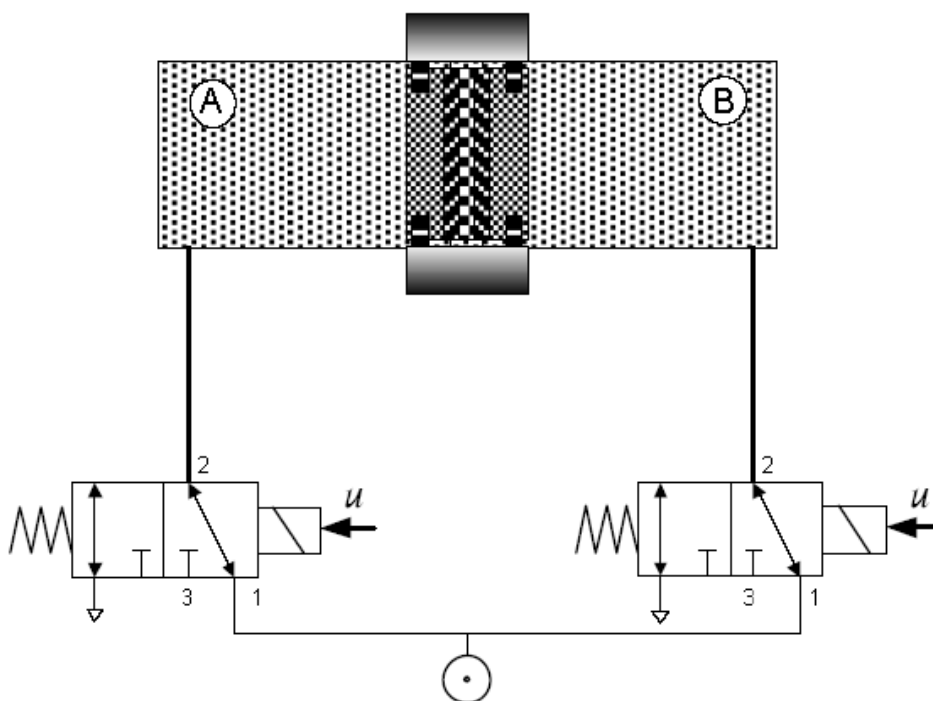
Predupravljani ventili upotrebljavaju se kod zahtjeva za većim protokom zraka, a zapravo su kombinacija elektromagnetskog i tlačnog aktiviranja ventila kod kojih elektromagnet služi za davanje signala u tlačni ventil koji vrši pomak razvodnog elementa. [2]

2. 2. 1 Princip rada elektromagnetskih ventila

Na slici broj 2. 5. prikazan je pojednostavljeni model pneumatskog cilindra bez klipnjače upravljanog elektromagnetskim dvopoložajnim ventilima.

U kućištu ventila smješten je elektromagnet (4), kao klasični elektromagnetski pretvarač, u kojem se prolaskom struje kroz namotaje stvara magnetsko polje, a samim time i magnetska sila koja privlači razvodni element (2), nasuprot sili opruge, čime se omogućuje strujanje zraka kroz ventil.

Magnetska sila ventila proporcionalna je iznosu električne struje kroz namotaje elektromagneta. Ukoliko se naponski upravljački signal ne dovede na ventil sila prednapregnute opruge (3) djeluje na razvodni klip držeći ventil zatvorenim. Svladavanje ove sile ima direktan utjecaj na vrijeme odziva ventila. [2]

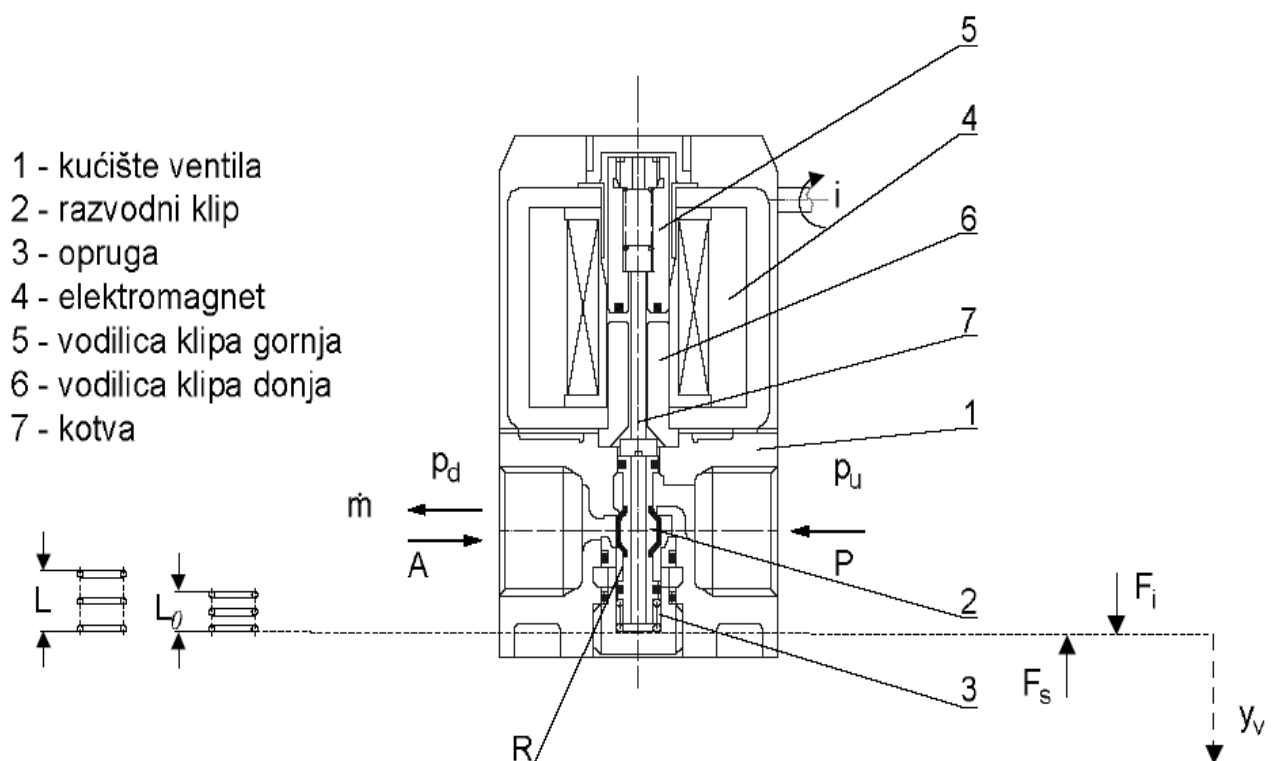


Slika 2. 5. Shematski prikaz pneumatskog cilindra bez klipnjače upravljanog elektromagnetskom dvopoložajnim ventilima

Konstruktivna izvedba direktno upravljano on/off elektromagnetskog ventila prikazana je na slici 2. 6.

Sila prednapregnute opruge F_s nastoji držati ventil zatvorenim, nasuprot magnetskoj sili, nastaloj kao rezultat prolaska električne energije i kroz namotaje ventila, koja pomiče razvodni element.

Efektivna površina za prolaz zraka funkcija je geometrijskog oblika razvodnog elementa i mijenja se zavisno o položaju razvodnog elementa.

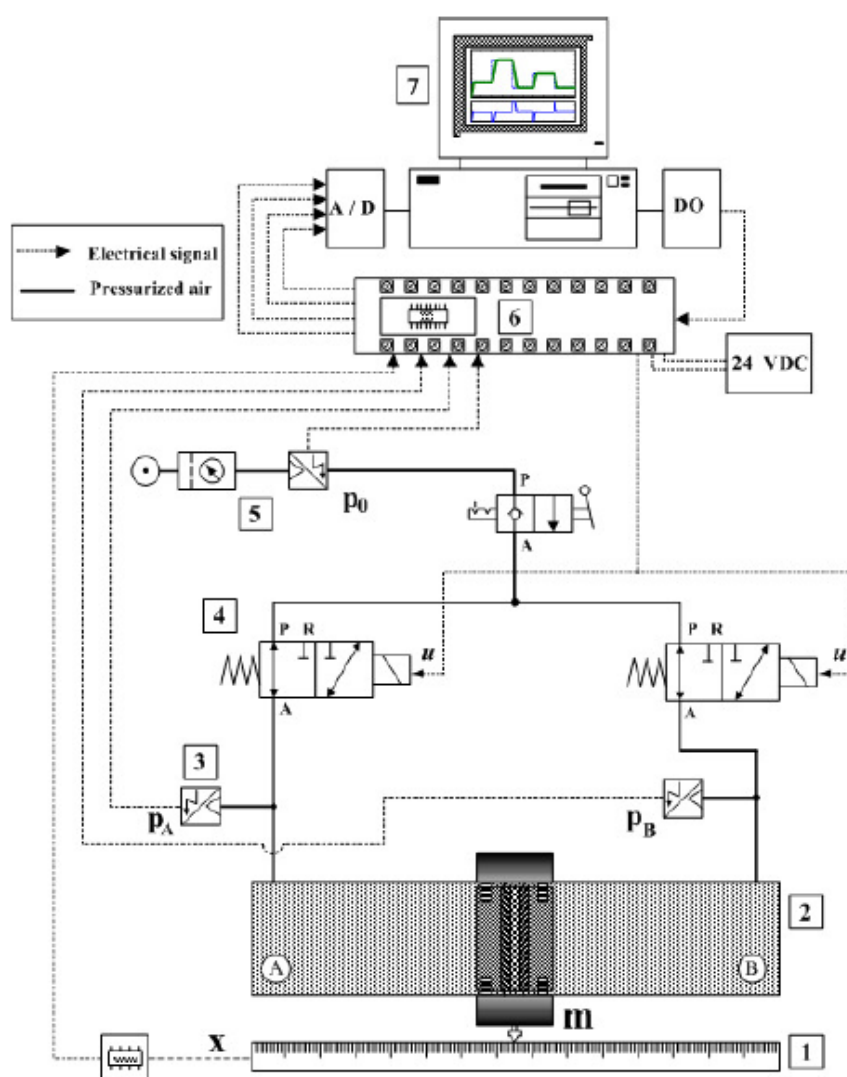


Slika 2. 6. Konstrukcijska izvedba direktno upravljano elektromagnetskog ventila SMC
EVT - 307

2. 3. Metoda dvopoložajne regulacije pneumatskih cilindara

Metoda regulacije položaja pneumatskih cilindara uvelike utječe na dobivene rezultate pozicioniranja kao što su brzina odziva, točnost, ponovljivost itd.

Za neposrednu regulaciju pneumatskog pogona upravljanog elektromagnetskim ventilima najjednostavniji način regulacije predstavlja princip kod kojeg redoslijed postavnog signala na ventilima zavisi od predznaka regulacijskog odstupanja, tzv. princip dvopoložajne regulacije (engl. *on-off control*).



Slika 2. 7. Realizacija regulacijskog kruga pneumatskog cilindra upravljanog elektromagnetskim ventilima metodom dvopoložajne regulacije.

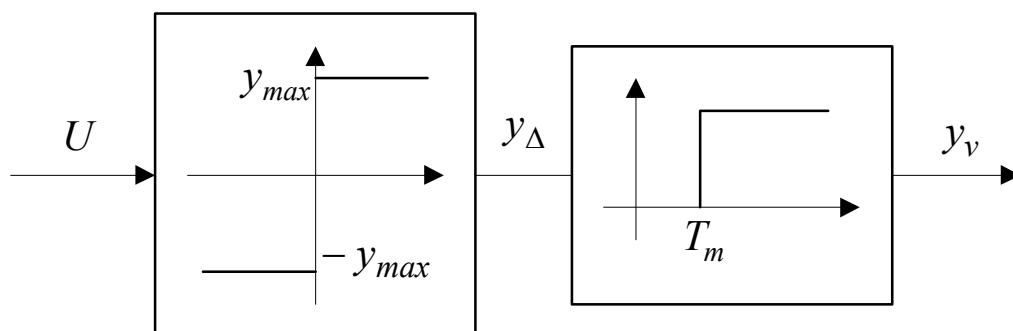
- 1 – Linearni potenciometar, FESTO MLO-POT-500-TLF
- 2 – Pneumatski cilindar, SMC CDY1S15H-500
- 3 – Senzori tlaka, SMC ISE4-01-26
- 4 – Dvopoložajni ventil, SMC EVT307-5DO-01F
- 5 – Pripremna grupa,
- 6 – Darlington driver, 8-bit ULN 2803
- 7 – PC računalo s PLC-812PG akvizicijskom karticom

Princip dvopoložajne regulacije primjenjuje se i u drugim industrijskim postrojenjima kao što je npr. regulacija temperature ili tlaka, dvopoložajnom sklopkom.

Upravljački signal pri dvopoložajnoj regulaciji može poprimiti dva iznosa napona:

$$U_{dr}(t) = \begin{cases} U_{\max} & U(kT) \geq 0 \\ -U_{\max} & U(kT) \leq 0 \end{cases}, \quad kT \leq t \leq (k+1)T. \quad (2-6)$$

U svrhu pojednostavljenja dinamičkog modela u graničnom slučaju, uz pretpostavku da je mrtvo vrijeme T_m puno veće od vremena otvaranja ventila T_s , elektromagnetski dvopoložajni ventil se može predstaviti kao idealna sklopka s mrtvim vremenom što je prikazano na slici 2. 8.



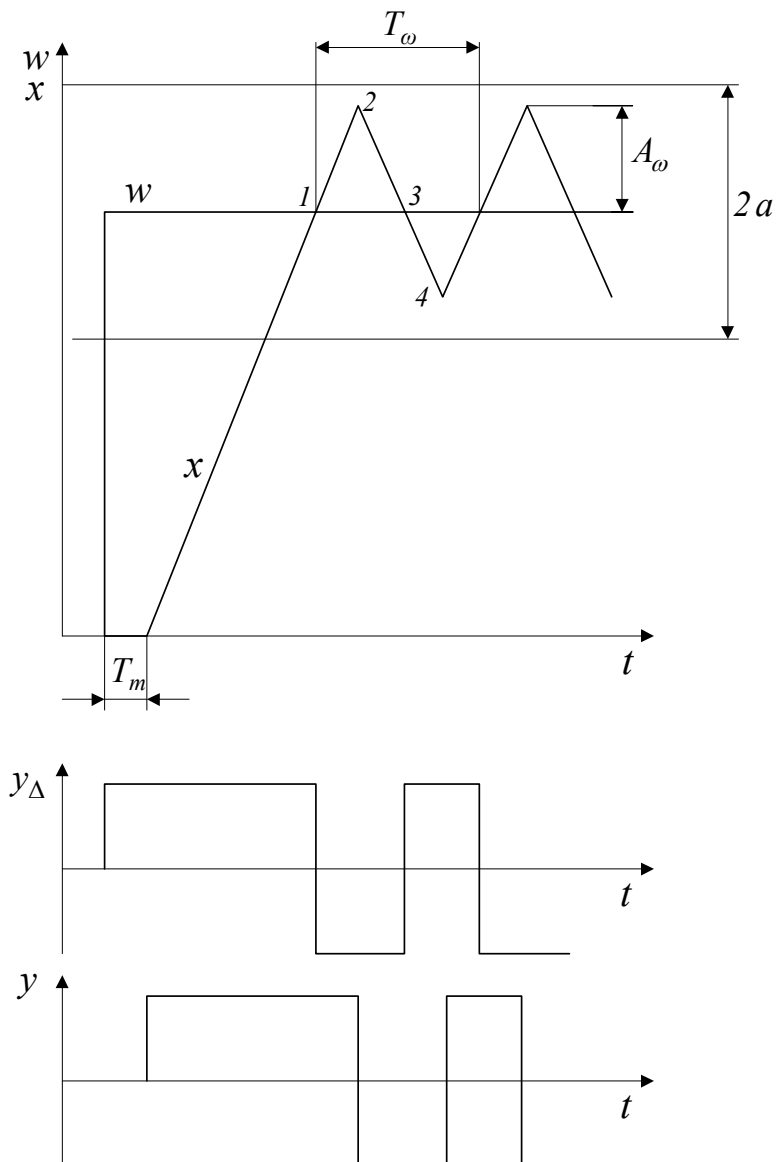
Slika 2. 8. Blok dijagram ventila predstavljenog kao idealna sklopka s mrtvim vremenom

Položaj ventila može se sada opisati sljedećim izrazom:

$$y_{dr}(t + T_m) = \begin{cases} y_{\max} & U_{dr}(t) \geq 0 \\ -y_{\max} & U_{dr}(t) < 0 \end{cases}. \quad (2 - 7)$$

Ponašanje pneumatskog sustava pri dvopoložajnoj regulaciji prikazano je na slici 2. 9. i opisano u sljedećim koracima:

1. Na odskočnu pobudu sustav reagira nakon mrtvog vremena T_m .
2. Upravljački signal je aktiviran sve dok je vodeća veličina $w(t)$ veća od pomaka cilindra $x(t)$, do točke 1.
3. U točki 1 upravljački signal se isključuje, ali zbog prisutnog mrtvog vremena cilindar nastavlja pomak do točke 2.
4. U točki 2 upravljački signal je postavljen na drugi ventil, dolazi do promjene smjera gibanja cilindra, do točke 3.
5. U točki 3 bi opet trebalo doći do promjene upravljačkog signala na ventilima, no zbog prisutnog mrtvog vremena cilindar nastavlja gibanje do točke 4.



Slika 2. 9. Ponašanje pneumatskog sustava pri dvopoložajnoj regulaciji

Dvopoložajna regulacija je uvijek nestabilan proces. Cilindar stalno oscilira oko željene pozicije s periodom osciliranja T_ω i amplitudom osciliranja A_ω .

Stoga je pozicioniranje sustava na principu dvopoložajne regulacije formalno zadovoljavajuće samo za one primjene kod kojih je amplituda oscilacije sustava manja od tražene točnosti pozicioniranja, tj.

$$2A_\omega < 2a. \quad (2 - 8)$$

Brzina odziva pneumatskog pogona zavisi o nazivnog promjera ventila i pojačanja regulacijskog kruga koji pak ovisi od geometrijskih izmjera cilindra i iznosa pokretne mase. Povećanju iznosa širine osciliranja sustava oko željene pozicije $2A_{\omega}$ pridonosi primjena sporijih ventila s većim iznosom mrtvog vremena, veći nazivni promjeri ventila kao i manje geometrijske dimenzije cilindara i manji iznos pokretne mase.

Kriteriji za izbor i izvedbu pneumatskog pogona za pozicioniranje upravljanog principom dvopoložajne regulacije može se sažeti u sljedećem [2]:

- tražena točnost pozicioniranja pogona mora biti manja od iznosa širine osciliranja sustava oko željene pozicije, tj.

$$2A_{\omega} < 2a, \quad (2 - 9)$$

- brzi elektromagnetski ventili su bolji izbor pri regulaciji jer imaju manje mrtvo vrijeme T_m koje se u konstrukcijskom smislu postiže smanjenjem mase pokretnog dijela ventila, tj. razvodnog elementa ventila,
- da bi odziv sustava bio brži potrebno je primijeniti ventile s većim nazivnim promjerom,
- da bi se iznos širine osciliranja sustava $2A_{\omega}$ držao što manjim potrebno je na pravi način izabrati i međusobno uskladiti geometrijske izmjere ugradbenih elemenata tj. nazivni promjer ventila, promjer i hod cilindra.

2. 4. Trenje cilindra

Trenje je fizikalna pojava koja predstavlja otpor u obliku tangencijalne reaktivne sile pri klizanju dvaju tijela u dodiru. Postojanje trenja ima negativan učinak u izvedbama preciznih servomehanizama. Trenje je nelinearna pojava koja uzrokuje statičku pogrešku regulacije i narušava karakteristike reguliranog sustava.

Vladanje pneumatskog pogona u režimu malih signala, pri malim brzinama gibanja, najviše će ovisiti o karakteristici trenja. Trenje nastaje između elemenata za brtvljenje i vodilica cilindra [2].

Postoje različiti statički i dinamički modeli za opis nelinearne karakteristike trenja. Svaki od modela uzima u obzir određene pojave koje se javljaju kod nelinearne karakteristike trenja.

Statički modeli trenja su:

- *Coulomb-ov model* trenja, tzv. suho trenje polazi od pretpostavke da je iznos sile trenja nezavisan od relativne brzine i dodirne površine tijela ali zavisi o predznaku brzine. Sila trenja za brzinu gibanja jednaku nuli ($\dot{x} = 0$) može poprimiti bilo koju vrijednost u intervalu $[-F_c, F_c]$.

- *Newton-ov model* opisuje tzv. viskozno trenje koje pretpostavlja da je sila trenja proporcionalna relativnoj brzini dvaju tijela u dodiru, tj.

$$F_f = k_f \dot{x} . \quad (2 - 10)$$

- Kod *Stribeck-ovog modela* trenja prijelaz sa statičkog na Coulomb-ov iznos trenja je postupan a u obzir se uzima i zavisnost o brzini gibanja

$$F_f = F_c + (F_s - F_c) e^{-|\dot{x}/\dot{x}_s|^{\delta_s}} + k_f \dot{x} , \quad (2 - 11)$$

gdje je:

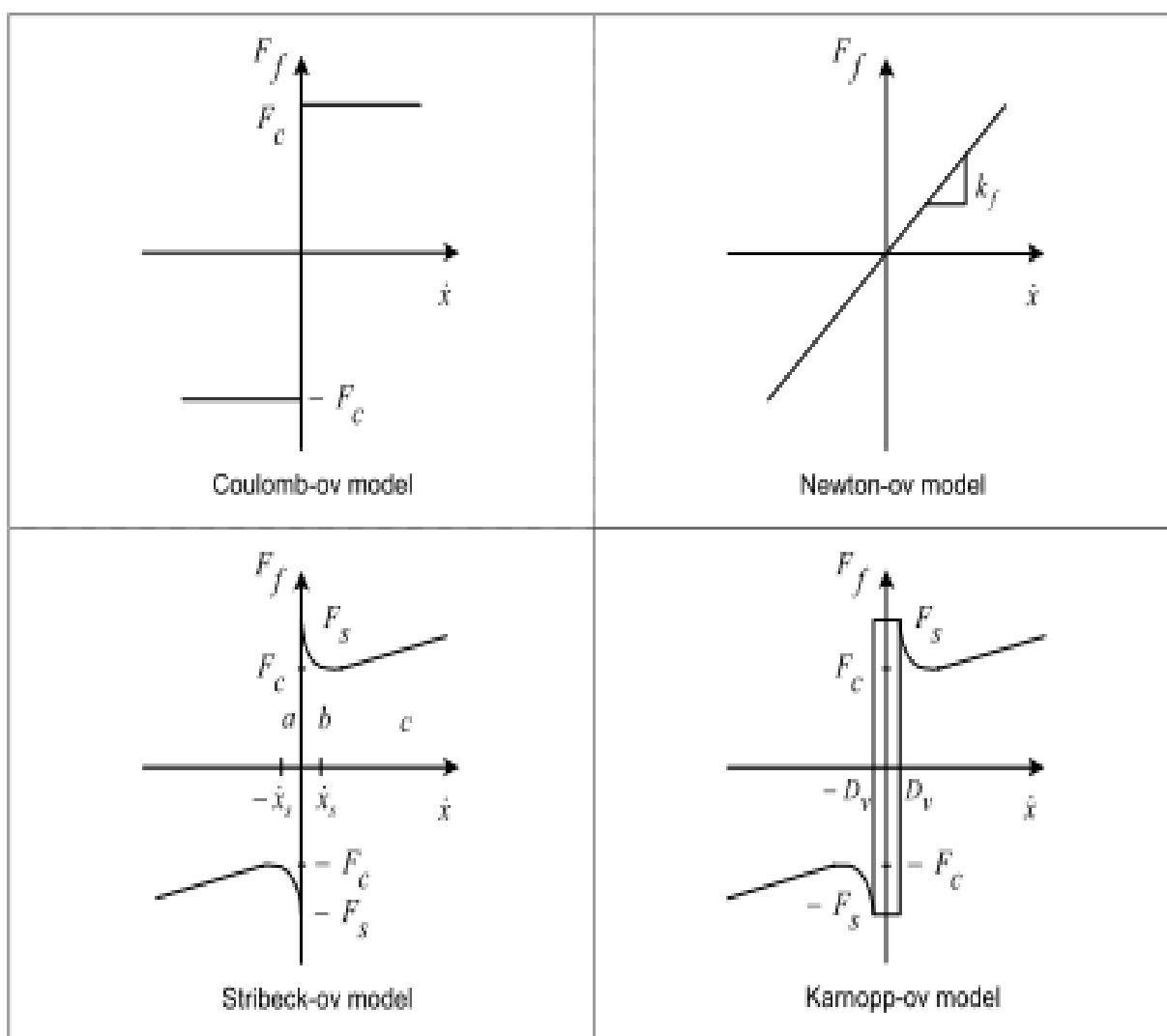
$\dot{x}_s = D_v$ Stribeck-ova brzina

δ_s eksponent koji se uzima kao $\delta_s = 2$.

Opis pojave trenja u sustavu Stribeck-ovim modelom pokazuje podjelu u tri dijela:

- a – statičko trenje (trenje mirovanja),
 - b – mješovito trenje,
 - c – viskozno trenje .
- *Karnopp-ov* model pretpostavlja da kada je relativna brzina gibanja unutar pojasa $\pm D_v$ tada se uzima da je tijelo u stanju mirovanja, a sila trenja se postavlja na iznos statičkog trenja $\pm F_s$. [2]

Statičke modele trenja prikazuje slika 2. 10.



Slika 2. 10. Statički modeli trenja

3. DINAMIČKI MODEL PROCESA

Prije samog početaka izrade dinamičkog modela trebamo navesti koji elementi sudjeluju kod upravljanja sustava. To su:

- izvor napajanja električnom energijom,
- sustav za pripremu i dovod zraka,
- proporcionalni 5/3 ventil,
- pneumatski cilindar (cijev s lopticom),
- mjerni sustav (optički senzor),
- upravljačko računalo.

Ovaj dinamički model razvijen je na temelju dinamike proporcionalnog ventila i dinamike procesa u cijevi koja obuhvaća zakonitosti strujanja zraka kroz otvor promjenjivog cilindra (cijevi), promjene tlaka u cijevi te ravnoteže sila na loptici.

Ovakav matematički model ima svoje značenje jer pokazuje smjernice za postupak sinteze reguliranog sustava. Pri tome treba naglasiti da taj postupak, ako se želi postići što veća točnost regulacije, zahtjeva i složeniji dinamički model koji se ne može uvijek postići, te je potrebno pronaći kompromis između jednostavnosti modela i točnosti dinamičkog opisa procesa.

Pod pojmom **sustav** podrazumjeva se cijeli regulacijski krug:

- regulator,
- cijev + proporcionalni ventil i mjerni član (slika 4. a).

Pod pojmom **staza** mislimo na prijenosnu funkciju koju ćemo obrađivati u slijedećem poglavlju. Staza opisuje zajedničko ponašanje cijevi i proporcionalnog ventila.

3. 1. Dinamički model pneumatskog sustava upravljanog propocionalnim ventilom

Kada kažemo propocionalni ventil tada mislimo na maseni protok zraka kroz ventil koji je propocionalan upravljačkom signalu (naponu). Privođenjem upravljačkog signala na elektromehanički pretvarač dolazi do pomaka ventila, koje registrira mjerno osjetilo i šalje povratni signal u elektronički dio za reguliranje pomaka klipa ventila.

Integrirana elektronika formira odgovarajući upravljački signal da bi se pomakom razvodnog klipa ventila dobio otvor strujanja koji omogućuje maseni protok fluida propocionalan privedenom upravljačkom signalu. Prema radu [2, str.17] je prikazana karakteristika protoka ventila u zavisnosti od privedenog signala napona, kao i područje neosjetljivosti propocionalnog ventila. Prema radu [2] pretpostavlja se trenutni odziv ventila (y_v) na upravljački signal (u), uz konstantnu propocionalnost C_v .

$$y_v = C_v u \quad (3 - 1)$$

Efektivna površina strujanja zraka kroz ventil A_v zavisi od regulirane pozicije razvodnog klipa ventila. U radu [2, str. 18] je prikazana zavisnost efektivne relativne otvorenosti ventila za privedeni naponski signal, gdje maksimalna površina ima iznos

$$A_{max} = 7,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (3 - 2)$$

3. 2. Dinamički model pneumatskog procesa

Dinamički model procesa dobiven je korištenjem tri fizikalna zakona:

- masenom protoku zraka kroz promjenjiv otvor ventila,
- promjene tlaka zraka u komori s promjenjivim volumenom,
- temeljnom zakonu za ravnotežu sila mehaničkog sustava,
- trenjem cilindra (cijevi).

Za izvod dinamičkog modela radi pojednostavljenja modela uvedene su pretpostavke kao što su:

- zrak je idealni plin, te je zanemarena njegova kinetička i potencionalna energija,
- temperatura zraka u cijevi je homogena,
- pretpostavlja se izotermni proces,
- tlak zraka u komori cijevi je homogen.

Tlak idealnog plina [3, str.162]:

$$p = \rho RT \quad (3 - 3)$$

Maseni protok zraka na ulazu cijevi :

$$W_{in} = C_d \cdot A_v \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (3 - 4)$$

pri čemu je

$$A_v = d_v \cdot \pi \cdot y_v \quad (3 - 5)$$

a volumenski protok ventila

$$q_v = k_g u \quad (3 - 6)$$

Ravnoteža sila u procesu

$$m_L \cdot \ddot{h} = p \cdot A_{ef} - F_{tr} = p \cdot A_{ef} - K_{ot} \cdot \dot{h} \quad (3 - 7)$$

p_c – tlak u cijevi,

q – gustoća komprimiranog zraka,

k_{ot} – koeficijent otpora trenja,

W_{in} – maseni protok na ulazu cijevi,

W_{out} – maseni protok gubitka,

m_L – masa loptice,

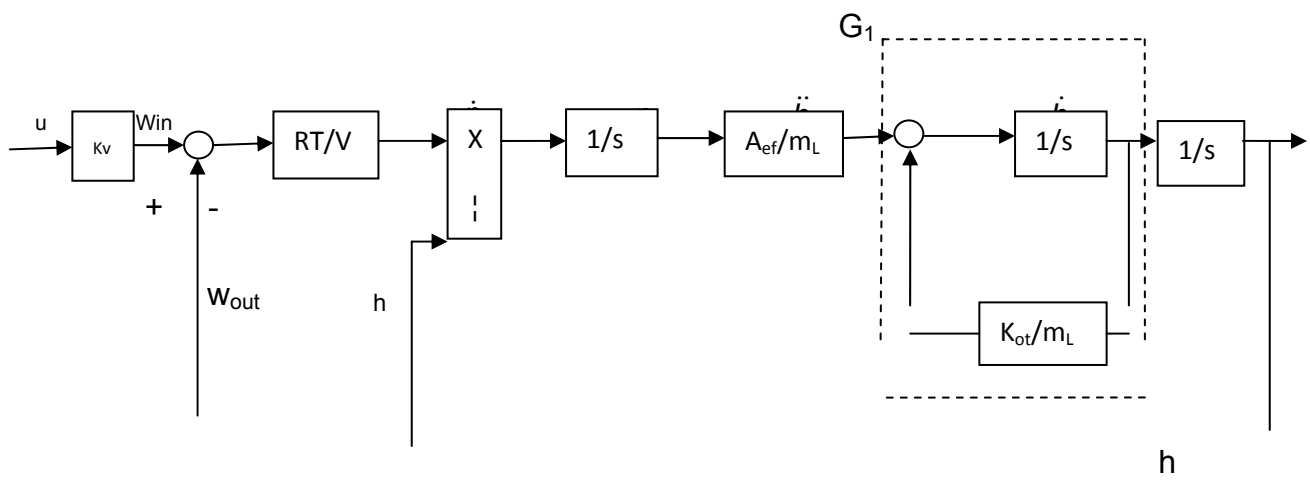
h – visina loptice,

\dot{h} – brzina loptice,

\ddot{h} – ubrzanje loptice,

q_v – volumenski protok ventila,

Blokovski prikaz prijenosne funkcije



Slika 3. 1. Blok dijagram regulacijskog procesa

Pojačanje propocionalnog ventila:

$$\frac{K_v}{1 + T_\Sigma S} = \frac{1}{1 + (T_v + T)_s} \quad (3 - 8)$$

Prijenosna funkcija podsustava G_1 sa slike 3. 1:

$$G_1 = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{ot}}{m_L}} = \frac{m_L}{m_L \cdot s + K_{ot}} \quad (3 - 9)$$

Prijenosna funkcija općeg oblika:

$$G_{(s)} = \frac{h(s)}{n(s)} = \frac{K}{s(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)} \quad (3 - 10)$$

Prijenosna funkcija procesa :

$$\begin{aligned} G_{(s)} &= \frac{h(s)}{u(s)} = \frac{K_v}{T_v s + 1} \cdot \frac{RT}{V} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{A_{ef}}{m_l} \cdot \frac{m_l}{m_l \cdot s + K_{ot}} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \frac{K_v \cdot \frac{RT}{V} \cdot \frac{A_{ef}}{m_l} \cdot m_l}{s(T_v s + 1) \cdot (m_l \cdot s + K_{ot})} \\ &= \frac{K_v \cdot \frac{RT}{V} \cdot A_{ef}}{s(T_v s + 1) \cdot (m_l \cdot s + K_{ot})} \\ &= \frac{C_o}{s \left[T_v m_l s^2 + (m_l + T_v \cdot K_{ot}) s + K_{ot} \right]} \end{aligned} \quad (3 - 11)$$

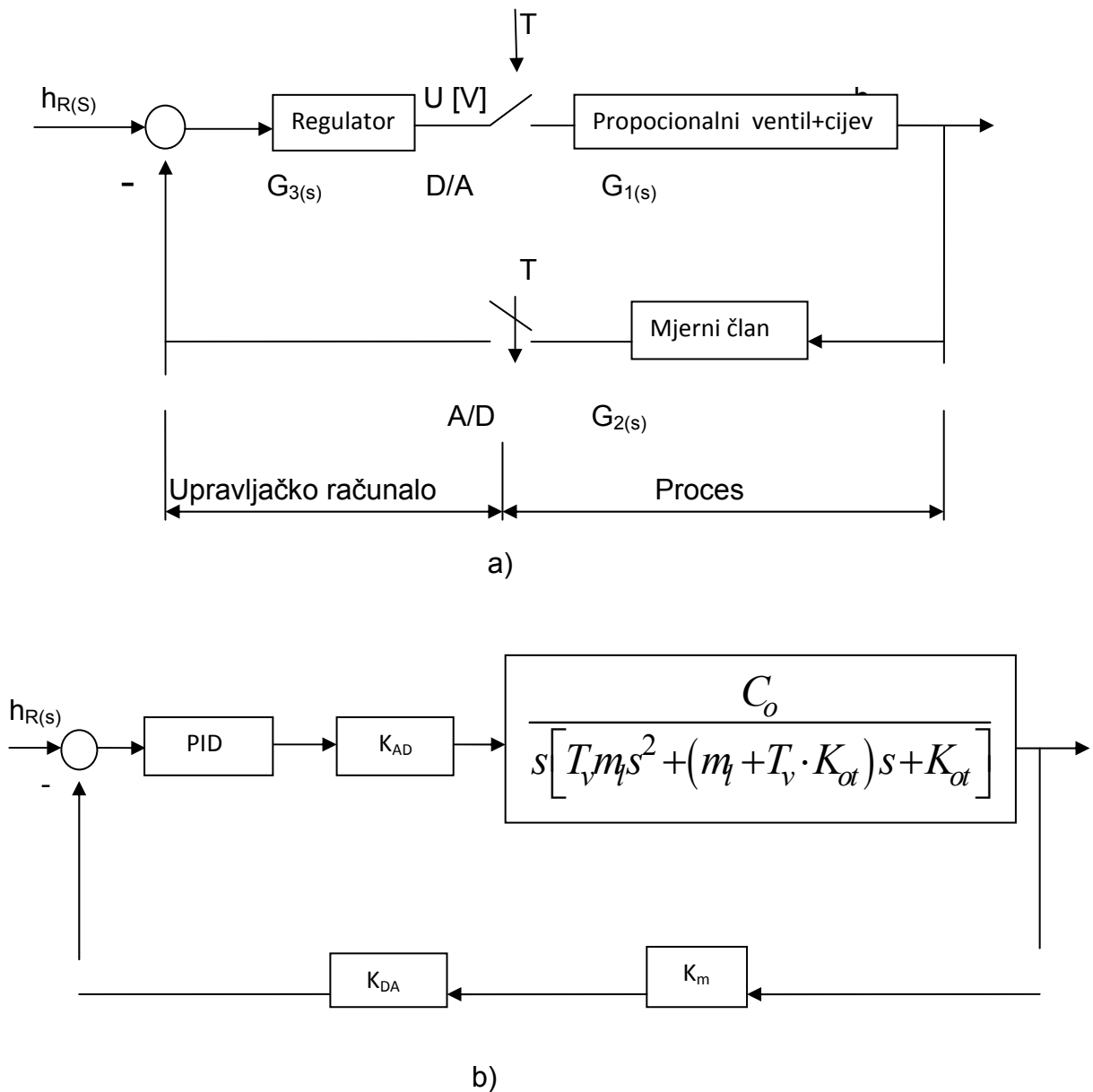
Dobivena je prijenosna funkcija 3. reda.

Točna prijenosna funkcija procesa u realnim postrojenjima nije uvijek poznata, pa se sinteza regulatora u takvim slučajevima ne može napraviti analitički niti simulacijom na računalu. Za takve procese regulator se podešava eksperimentalno, pri čemu se koriste preporuke na osnovi eksperimenta u otvorenom ili zatvorenom krugu.

4. SIMULACIJA PROCESA

4. 1. Blokovski prikaz regularnog sustava

Nakon što smo dobili prijenosnu funkciju procesa koju ćemo koristiti kod simulacije procesa slijedi blokovski prikaz sustava, slika 4. 1. a) i b).



Slika 4. 1. a) Strukturna blokovska shema digitalnog kruga regulacije položaja

b) Nadomjesni kontinuirani regulacijski krug položaja

$G_{1(s)}$ - prijenosna funkcija staze (cijev + propocionalni ventil),

$G_{2(s)}$ - prijenosna funkcija mjernog člana (optički senzor),

$G_{3(s)}$ -prijenosna funkcija regulatora.

Na osnovu dobivene blok sheme (slika 4. 1. b) dobiva se prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga. Karakteristična jednačba sustava je polazište za ispitivanje stabilnosti prema Hurwitz-u. Primjenom Hurwitz-ovog kriterija na prijenosnu funkciju zatvorenog kruga dobivaju se nužni i dovoljni uvjeti za stabilnost sustava.

Također drugi važan kriterij je da se postigne zadovoljavajuće regulacijsko djelovanje, to jest da što točnije, brže i sa što manje oscilacija regulirana veličina $h_{(s)}$ slijedi vodeću veličinu $h_R(s)$.

Upravo je to glavna zadaća sinteze regulacijskog kruga, da odredi optimalne parametre regulatora (K_R, T_i, T_d), da bi sustav ispunio zahtjeve koji se traže pri regulaciji.

4. 2. Simulacija procesa upravljanog propocionalnim ventilom

Nakon što se izradi dinamički model pneumatskog sustava i definiraju svi parametri koji sudjeluju u sustavu, pneumatski sustav se može simulirati. Pneumatski sustav može se prikazati i kao blok dijagram (simulacijska shema) te simulirati ponašanje za zadane ulazne veličine nakon što se definiraju svi potrebni parametri i izradi dinamički model pneumatskog sustava.

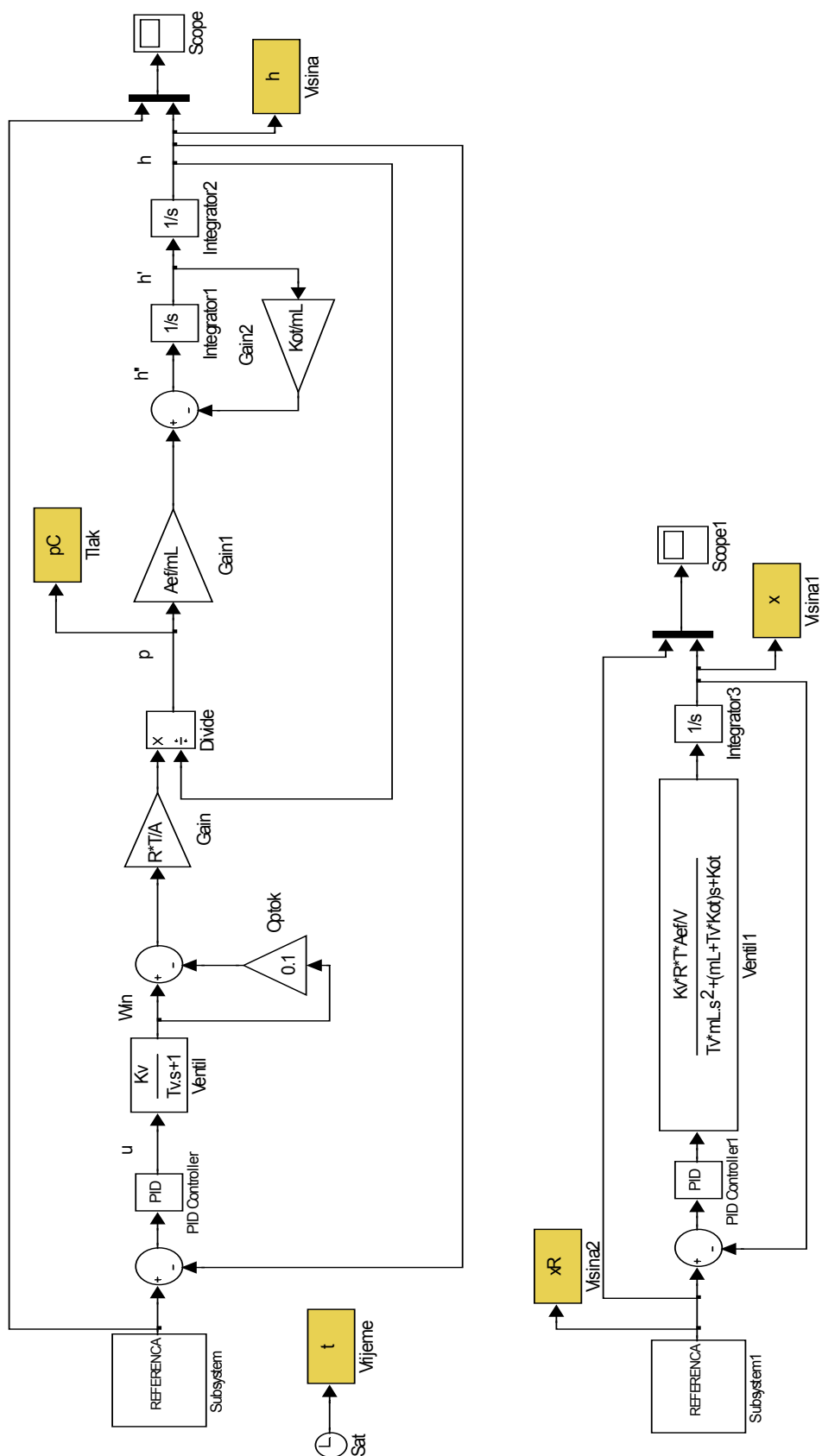
Za tu svrhu koristi se programski paket **MATLAB** i program za izradu simulacijskih modela **SIMULINK**.

Simulacijski modeli pneumatskih servosustava izrađeni u *Simulinku* predstavljaju dinamičke modele pneumatskih servosustava prikazanih u grafičkom obliku povezanih blokovima.

Svaki blok predstavlja jedan dio dinamičkog modela, bilo jednadžbu, konstantu, parametar i slično.

Da bi blokovi mogli ekvivalentno predstavljati simulacijski model u simulacijskoj shemi potrebno je sve vrijednosti i relacije zapisati u *Matlab*-ovu bazu podataka kreiranu za taj model (*m – file*) iz koje *Simulink* dobiva podatke potrebne za izvođenje simulacije.

Simulacija pneumatskog sustava bit će izvršena, a dobiveni rezultati prikazuju se u grafičkom obliku nakon što se podese parametri simulacijskog modela.



Slika 4. 2. Simulacijski model cijevi u programu MATLAB

Parametri sustava korišteni u simulacijskom modelu

Parametri sustava korišteni u simulacijskoj shemi pneumatskog sustava upravljanog proporcionalnim ventilom

% Parametri sustava

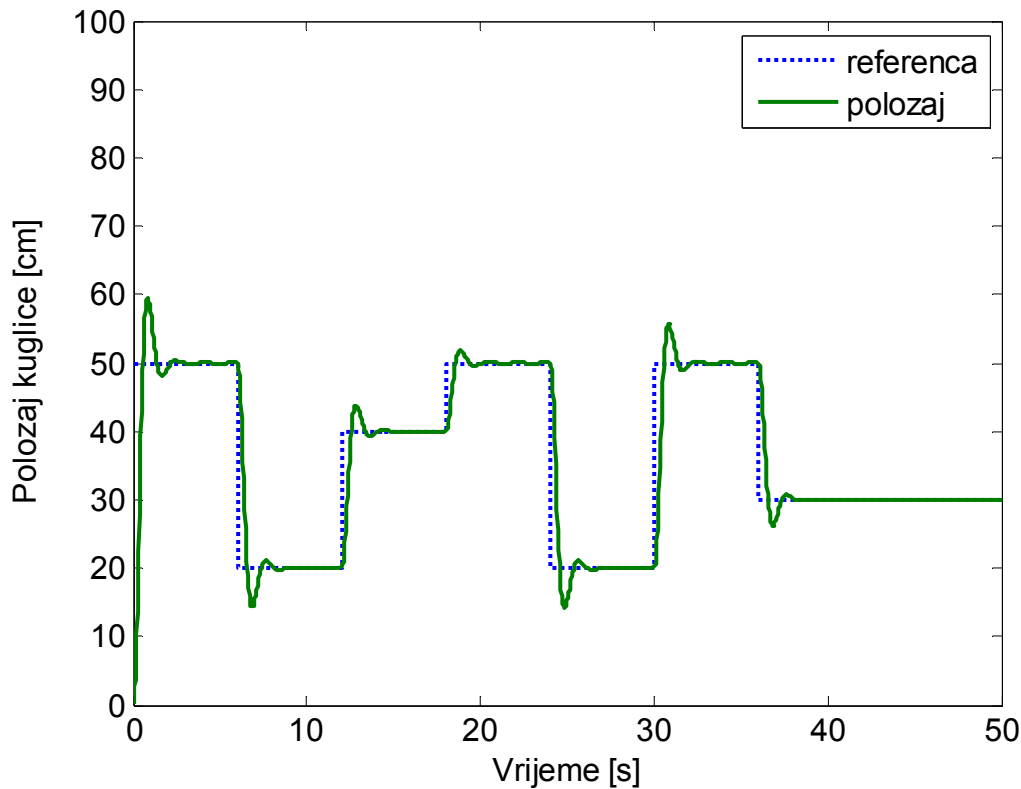
$K_v = 0.00025$	% m/V	koeficijent ventila
$T_v = 0.01$	% s	vremenska konstanta ventila
$R = 287$	% J/kg K	plinska konstanta
$T = 293$	% K	temperatura
$A = 0.040^2 \cdot 3,14/4$	% m^2	površina cijevi
$V = A \cdot h$	% m^3	volumen cijevi
$A_{ef} = 0.039^2 \cdot 3,14/4$	% m^2	površina loptice
$m_L = 0.003$;	% kg	masa loptice
$K_{ot} = 0.1$	% Ns/m	koeficijent trenja
$O_p = 0.1$	% m^3	optok oko loptice
$P_o = 3 \times 10^5$	% Pa	tlak napajanja
$P_{at} = 1 \times 10^5$	% Pa	atmosferski tlak

Tablica 4. 3. Parametri sustava korišteni u simulacijskom modelu

Nakon što smo izradili blok dijagram (simulacijske sheme) uz predhodno izrađen dinamički model, Simulinku su dani svi potrebni parametri te se može napraviti simulacija

odziva pneumatskog pogona na željenu referencu (skokovitu promjenu signala napona). Slika 4. 4.

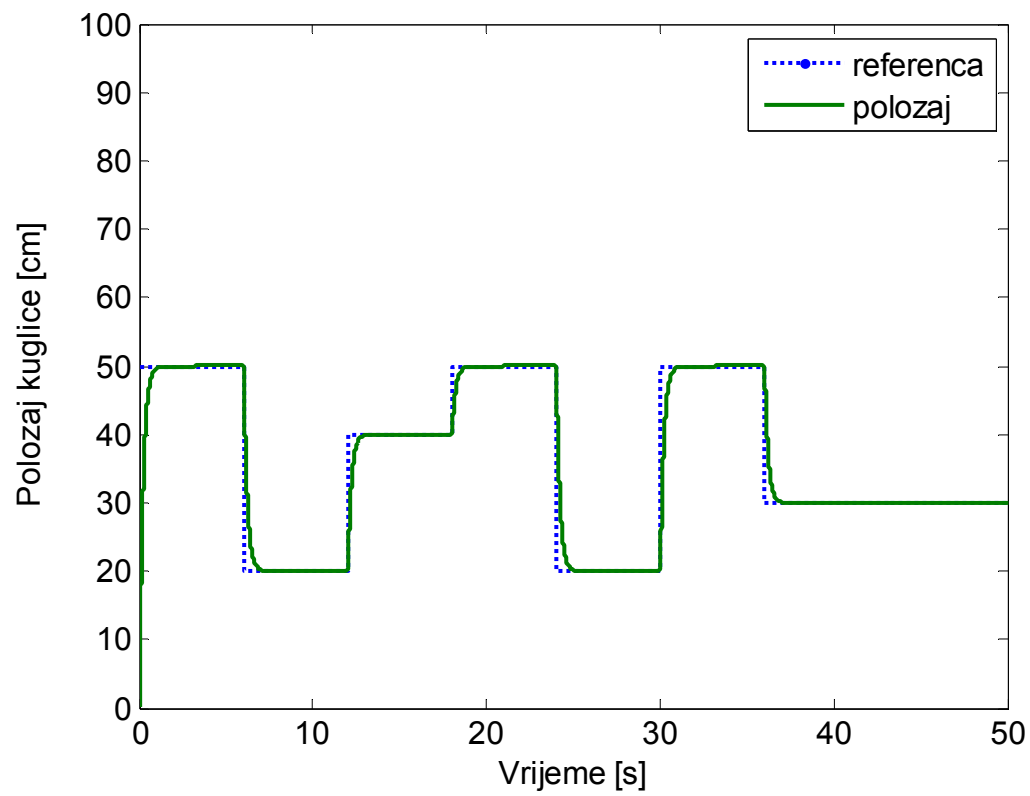
Kakvi su rezultati ponašanja pneumatskog pogona dobiveni ovisi o parametrima koje smo zadali te načinu njegovog upravljanja.



Slika 4. 4. Simulacijski rezultati odziva sustava na skokovitu promjenu reference primjenom P-regulatora

Pojačanje K_p se odnosi na P regulator u povratnoj vezi simulacijskog modela pneumatskog sustava. Povećanjem ili smanjenjem njegove vrijednosti počinje se nestabilno ponašati, te oscilira oko željene reference. Slika 4. 4.

Slika 4. 5. prikazuje odziv na skokovitu promjenu referentne vrijednosti kod primjene PD regulatora, te zadovoljavajuće prati referentnu vrijednost. Smanjenjem pojačanja K_p loptica ima sve veće kašnjenje odziva na skokovitu promjenu naponskog signala i sve lošije prati referentne vrijednosti.



Slika 4. 5. Simulacijski rezultati odziva sustava na skokovitu promjenu reference primjenom PD-regulatora

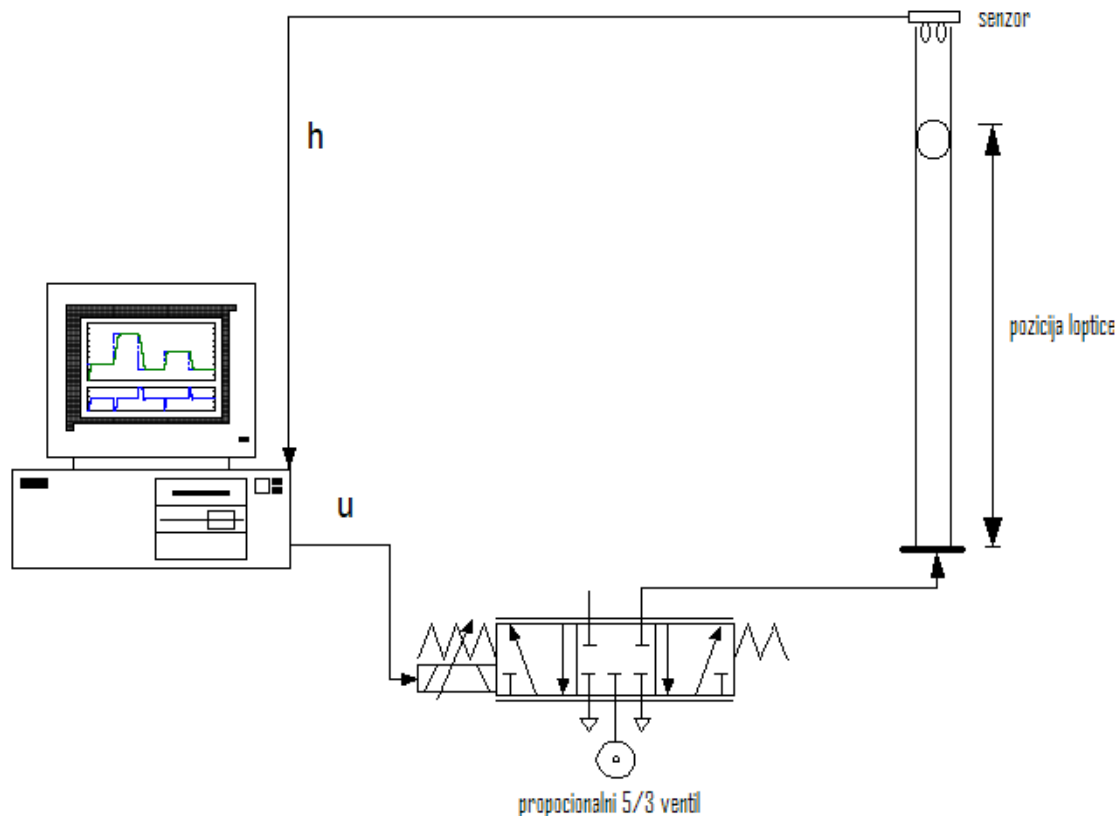
5. PROJEKTIRANJE NASTAVNE MAKETE

Prilikom izrade makete pneumatskog sustava upravljanja i regulacije željelo se prikazati usporedba između regulacije i upravljanja elektromagnetskim on – off ventilima i propocionalnim ventilima. Zbog kratkog vremena potrebnog za cjelokupni prikaz simulacija i provedbe eksperimenta nisu se stigla napraviti potrebna mjerenja elektromagnetskih on – off ventila.

Projektna maketa je predviđena za prikaz obje mogućnosti ali mi ćemo dalje baviti samo regulacijom i upravljanjem propocionalnim ventilom te će se u ovom poglavlju izlagati sastavne komponente koje sudjeluju u ostvarenju eksperimentalnih rezultata.

U maketi su korištene slijedeće komponente:

- cijev od plexiglasa visine 1000 mm i unutarnjeg promjera 40 mm,
- ping-pong loptica 39 mm,
- propocionalni 5/3 ventil,
- optički senzor Scharp GP2D12,
- pripremna grupa,
- PC računalo s NI DAQ Card 6024E akvizicijskom karticom,
- senzori tlaka SMC ISE4-01-26.



Slika 5. Pneumatski sustav upravljan propocionalnim 5/3 ventilom

Princip regulacije se odvija na način da pripremna grupa daje određen protok zraka tlaka do 5 bara, a preko propocionalnog 5/3 ventila se propušta ona količina protoka zraka koja je potrebna da bi loptica pratila referentnu zadanu vrijednost.

Senzori prisutnosti (engl. proximity sensors) koriste se za detekciju prisutnosti predmeta u blizini senzora. Na svom izlazu oni putem naponskih razina daju binarnu informaciju o prisutnosti (npr. '0' – predmeta nema, '1' – predmet prisutan).

Po svom fizikalnom principu rada ti se senzori dijele na:

- magnetske,
- induktivne,
- kapacitivne,
- optičke,
- ultrazvučne i
- pneumatske.

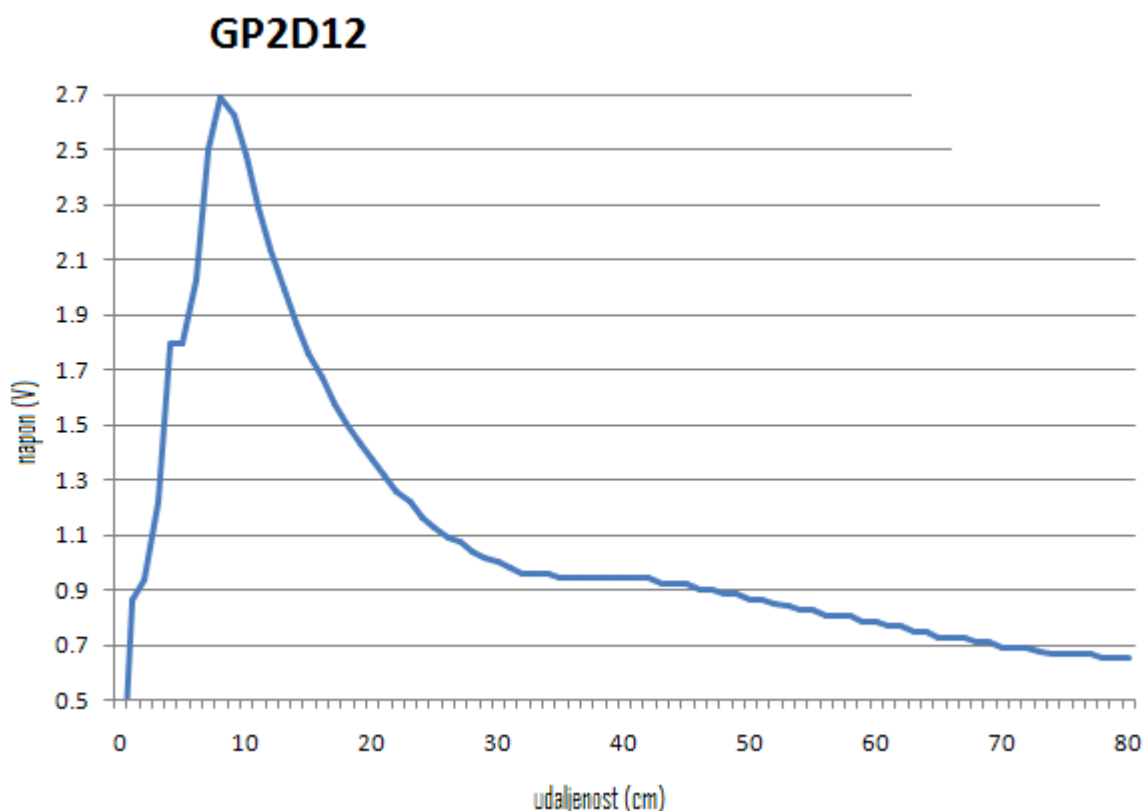
Optički senzori koriste fotoelektrična svojstva pojedinih poluvodičkih materijala, tj. mogućnost pretvorbe električnog signala u svjetlost (LED) i mogućnost promjene vodljivosti poluvodičkog materijala obasjanog svjetlošću (fotodiode i fototranzistori).

Za emitiranje svjetlosti pomoću LED služi odašiljač (engl. emitter), a za primanje koristimo fotodiodu ili fototranzistor prijemnik svjetlosti (engl. receiver).

Optički senzor, koji se nalazi na vrhu cijevi mjeri udaljenost loptice i daje signal 0-5V koji odgovara udaljenosti po karakteristici na slici 5.1.

Analogni IN signal dolazi do elektroničkog sklopa koji daje OUT digitalni signal koji se dalje preko akvizicijske kartice i PC-a (Matlab) procesira i regulira u programu Simulink, koji dalje preko proporcionalnog 5/3 ventila ponovno regulira količinu potrebnu da bi loptica pratila referentu vrijednost.

Tu su još senzori tlaka SMC ISE4-01-26 koje se također spajaju na upravljačko računalo.

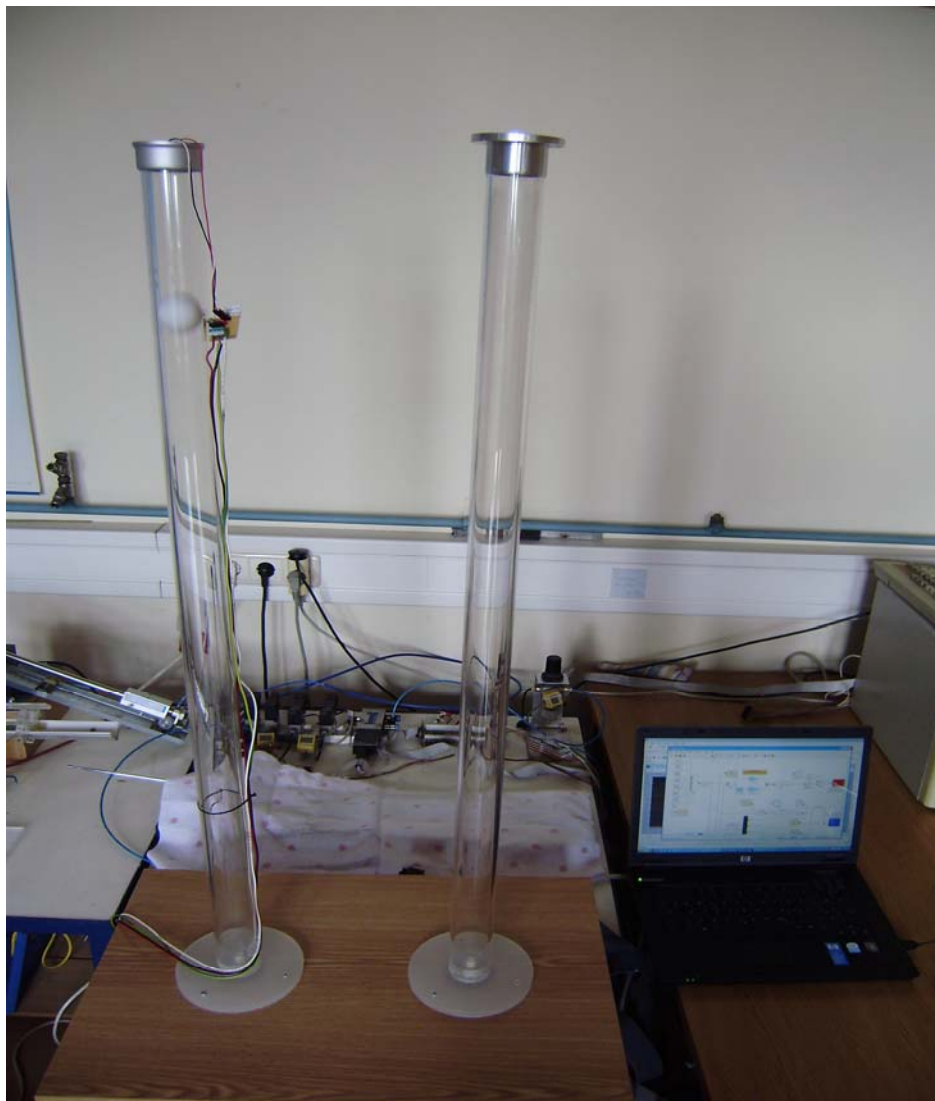


Slika 5. 2. Karakteristika senzora GP2D12 udaljenosti i napona

Mjerne vrijednosti udaljenosti optičkog senzora se kreću između 10 cm i 80 cm. Optički senzor daje napon od 0 – 5 V, koji po karakteristici daje za neku udaljenost u cm određenu vrijednost napona. Tako npr. za vrijednost 50 cm, napon iznosi po karakteristici 0,88 V. Sve te vrijednosti smo unijeli kao referentne u program Simulink za eksperimentalno izvođenje regulacije.

Pravim odabirom senzora mogu se postići i precizniji rezultati, naravno u onim okvirima koji se stavljaju na teret točnosti, stabilnosti i potrebe regulacije i upravljanja pneumatskim sustavom.

Nadalje, važna komponenta u sustavu je proporcionalni ventil koji je objašnjen u poglavlju 2.1. Pneumatski pogon upravljan proporcionalnim ventilom.



Slika 5. 3. Fotografija laboratorijskog modela reguliranog pneumatskog sustava

6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Eksperimentalno snimljeni odziv regulacijskog kruga pozicije primjenom samo pojačanja regulatora (P regulator) pokazuje oscilatorno ponašanje s obzirom na referentnu veličinu.

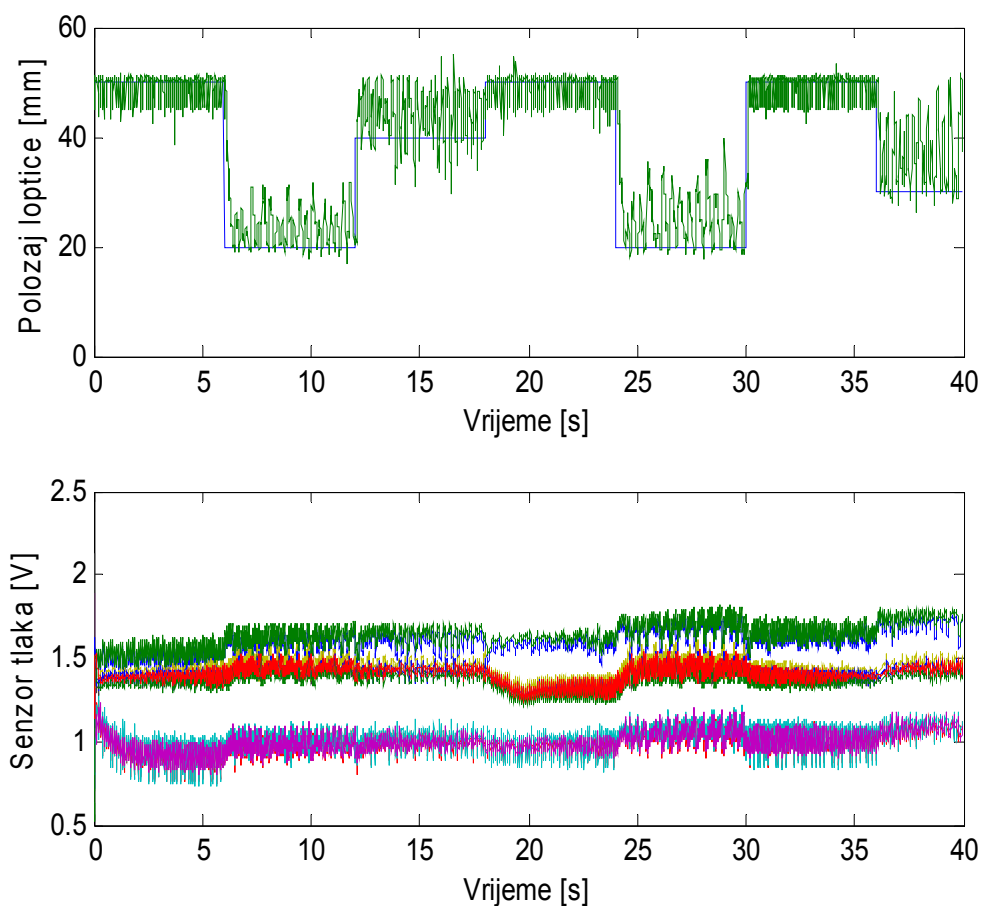
Smanjivanjem pojačanja regulatora i oscilatornost bi se smanjila, ali bi to uzrokovalo i povećanje statičke pogreške procesa.

Primjenom P regulatora se dovodi do nestabilnog vladanja sustava, pa se pojačanje proporcionalnog dijela mora ograničiti na usko područje mogućih iznosa.

Primjena pneumatskog sustava za zadatke pozicioniranja kod kojih se traži odziv sustava bez nadvišenja regulirane veličine nužno bi uvjetovala daljnje smanjenje pojačanja regulatora. Međutim, smanjenje pojačanja regulatora ima za posljedicu i znatno usporenje brzine odziva regulirane veličine i povećanje statičke pogreške procesa. Pogreška pozicioniranja uglavnom je posljedica točnog doziranja masenog protoka zraka u sustavu.

Primjena P regulatora pokazuje slabu robustnost na vanjske poremećaje kao što su promjenljivost tlaka dobave koji u ovom eksperimentalnom sustavu iznosi svega 0,7 bara.

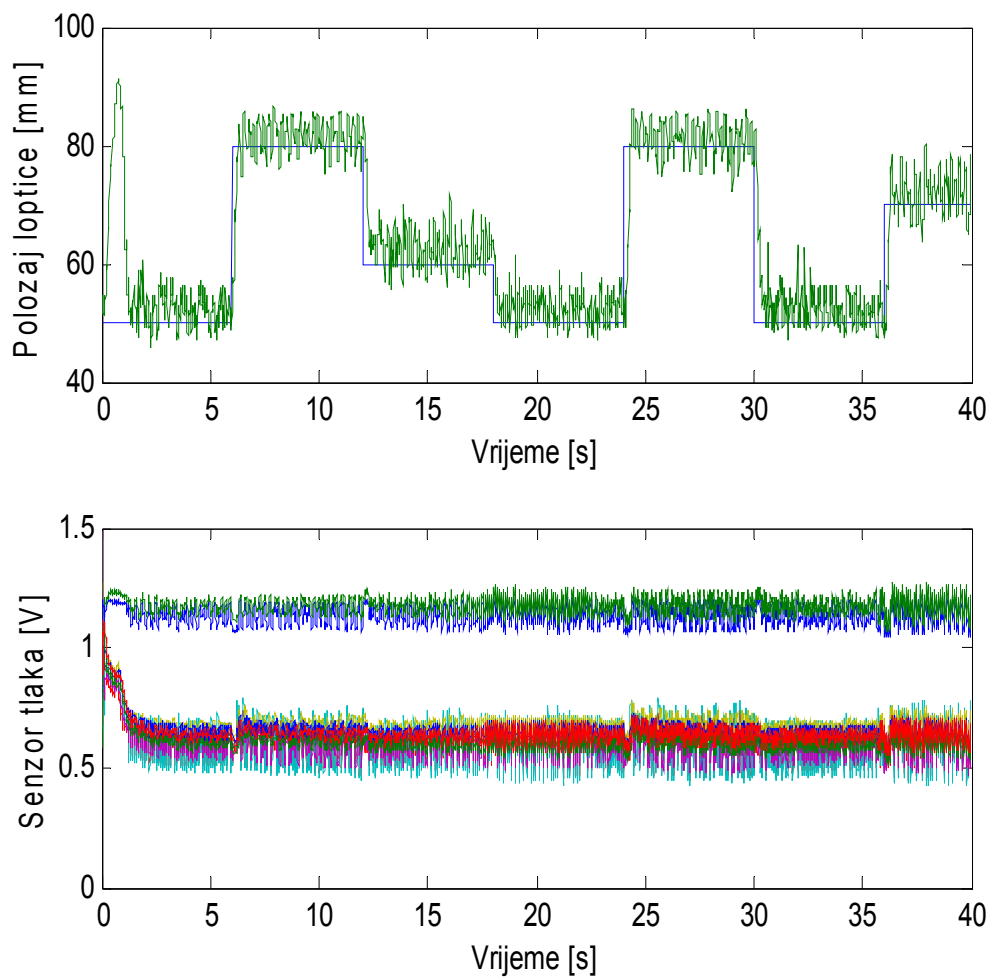
Simulacijska shema regulacijskog kruga položaja loptice primjenom PD regulatora prikazana je na slici 4. 2.



Slika 6. 1. Regulacija položaja loptice, eksperemintalni odziv

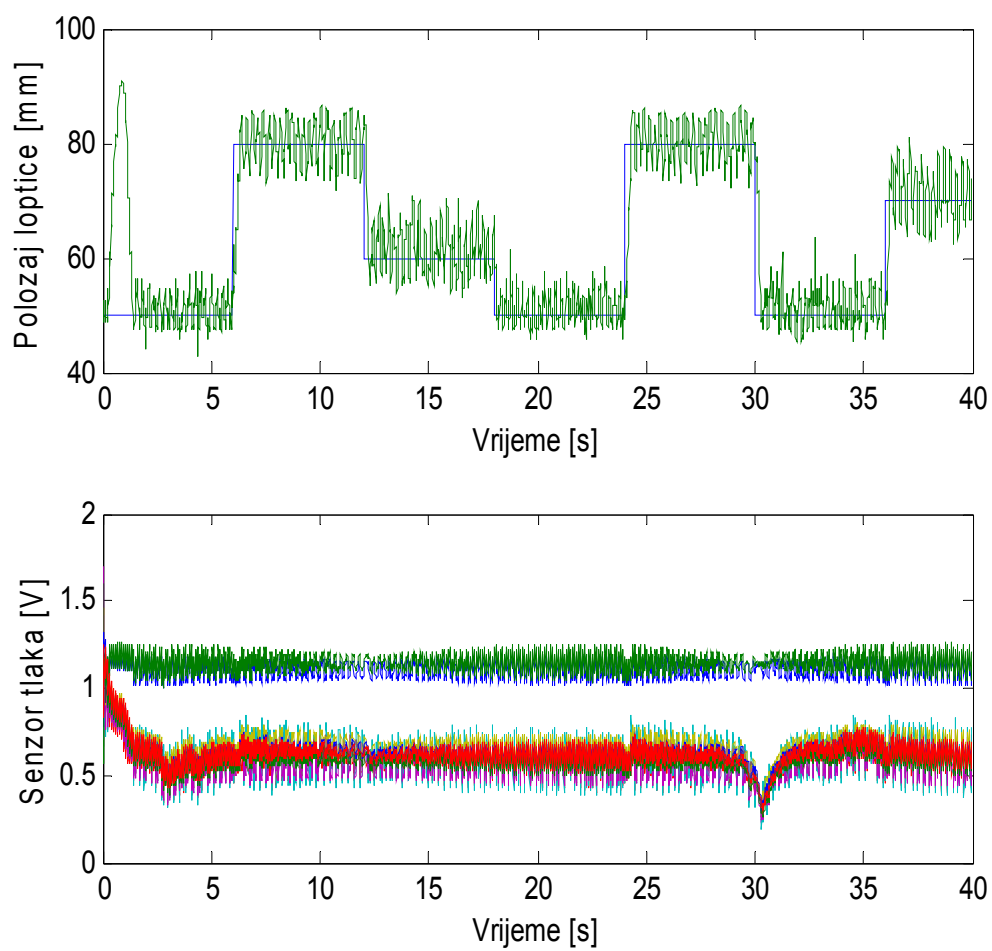
Primjenom PD regulatora, pri čemu se uvodi nultočka regulatora s derivacijskom vremenskom konstantom dT u blizini vremenske konstante procesa T_s , kompenzirajući njen utjecaj na odziv regulacijskog kruga, dobiva se povoljnije vladanje regulacijskog kruga pozicije. Eksperimentalni rezultati regulacijskog kruga položaja loptice primjenom PD regulatora prikazana je na slici 6. 1.

Postupak regulacijskog kruga položaja primjenom različitih struktura regulatora temelji se na lineariziranom dinamičkom modelu procesa, a poboljšanje postupka regulacije tražit će se modificiranjem parametara regulatora tijekom eksperimentalne provjere algoritama regulacije.

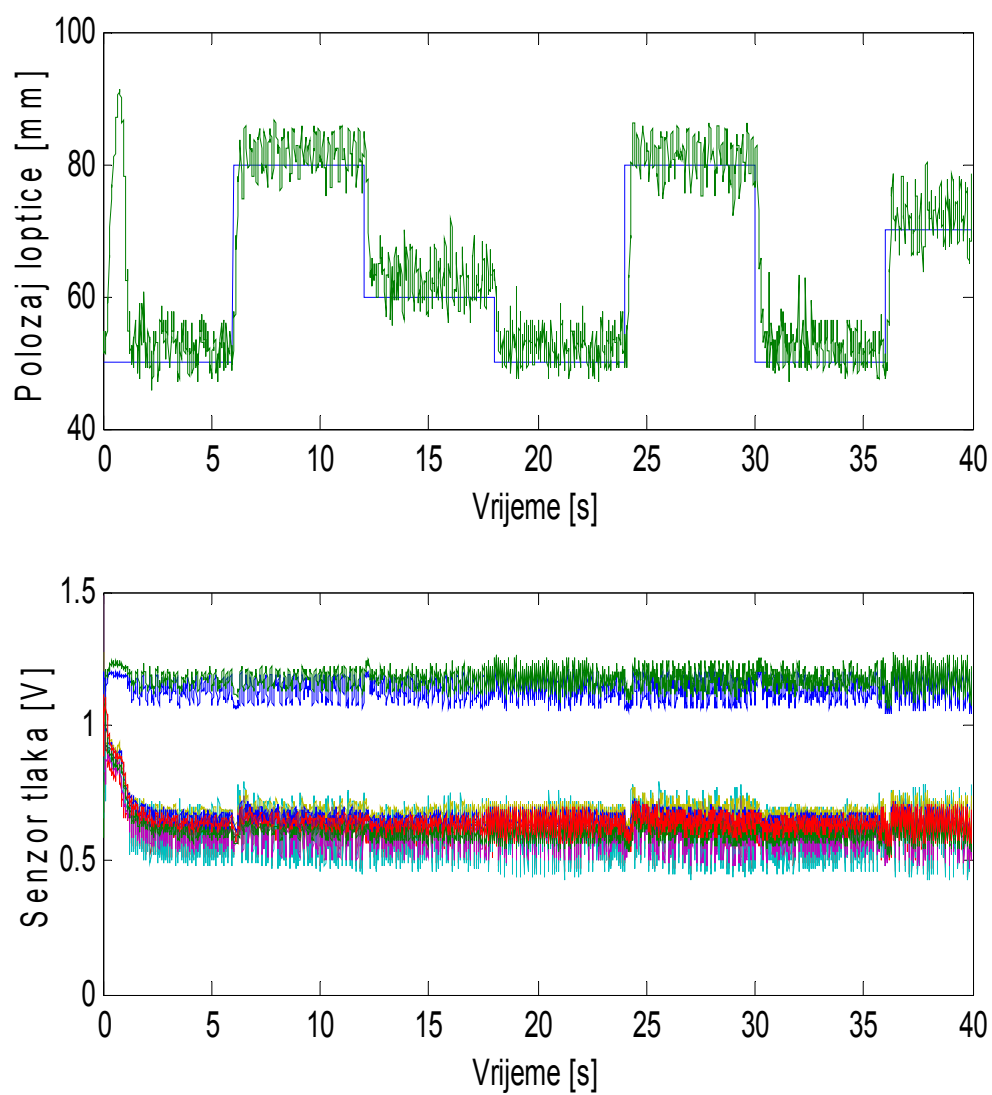


Slika 6. 2. Regulacija položaja lopatice eksperimentalni odziv $K_p=1$, $K_d=0.075$

Na slici 6. 2. se vidi eksperimentalni rezultat odziva regulacijskog kruga pri kojem se pojačanjem PD regulatora ($K_p=1$, $K_d=0,075$) utječe na stabilnost sustava. Sustav pokazuje relativno brzi odziv, ali točnost sustava u pojedinim referentnim pozicijama je nezadovoljavajuća (pogreška regulacije dostiže iznose i do $\pm 10 \text{ mm}$).



Slika 6. 3. Regulacija položaja loptice eksperimentalni odziv $K_p=4$, $K_d=0.01$



Slika 6. 4. Regulacija položaja loputice eksperimentalni odziv $K_p=10$, $K_d=0.075$

7. ZAKLJUČAK

Razvojem automatizacije i robotike u gotovo svim granama tehnike došlo je i do razvoja pneumatskih sustava. Njihova potreba za upravljanjem i regulacijom podrazumjeva točan i kvalitetan odabir, koji treba zadovoljiti zadane parametre od strane naručitelja.

Prilikom izrade pneumatskog sustava dolazi se do izbora komponenti koje utječu na dobivene rezultate (stabilnost, točnost, preciznost). Sami zahtjevi koje treba ispunjavati pneumatski sustav moraju biti usklađeni s mogućnostima tih komponenti, njihovim tehničkim osobinama, kao i samom cijenom.

Razvoj sve složenijih reguliranih pneumatskih sustava dovodi i do potrebe za određivanjem matematičkih modela tih sustava koji mogu biti vrlo komplicirani te zahtjevaju veliku stručnost projektanta za ispravno vođenje procesa. Pri tome nam pomažu projektne makete na kojima se može izvoditi regulacija i upravljanje u svrhu dobivanja najboljih rezultata eksperimenata, te na taj način mogu pomoći u zadacima izbora komponenti sustava (upravljački elementi, izvršni elementi, mjerni uređaji, itd.) i uvjeta rada (tlak napajanja, potrebni protoci, izvedba regulatora i sl.) da bi se ispravno vodio proces.

U ovom diplomskom radu na osnovu dobivenog dinamičkog modela i prijenosne funkcije u poglavlju 3, načinjena je simulacija sustava u programu Matlab-Simulink. Simulacija je rezultirala relativno dobrim odzivom signala na referentnu veličinu te ukazala na tip regulatora koji može ispravno voditi proces. Eksperimentalni rezultati su pokazali odstupanja od simulacijskih rezultata zbog neuključenih fenomena reguliranog procesa i mjernog uređaja. Kako je ovaj pneumatski sustav opisan sustavom trećeg reda, eksperimentalni rezultati su pokazali da klasičnim P regulatorom nije moguće dobiti zadovoljavajuću točnost koja se dobiva simulacijom. Klasični PD regulatori daju stabilniji i prigušeniji odziv, ali je upravljački signal ulazi u zasićenje za svaku novuvrijednost referentne veličine. Točnost se kreće $\pm 10\text{mm}$, što nije zadovoljavajuće za odvijanje precizne regulacije pneumatskih sustava.

Prilikom izrade diplomskog rada trebalo je napraviti i eksperiment s elektromagnetskim dvopoložajnim ventilom, međutim zbog kratkog vremena eksperiment nije načinjen.

Ovakvim izradama nastavnih maketa se može postići da dobivene rezultate dalje dorađujemo i analiziramo, te raznim konstrukcijskim i upravljačkim poboljšanjima nastojimo postići bolje rezultate regulacije sustava.

U izradi ovog diplomskog rada nije bio naglasak na preciznost i točnost rezultata već na samoj izradi makete koja će dalje poslužiti u nastavne svrhe.

Literatura:

- [1] Šitum, Željko, Regulacija pneumatskog servosustava primjenom neizrazitog regulatora, doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2001.
- [2] Šitum, Željko, Regulacija hidrauličkih i pneumatskih sustava, autorizirana predavanja
- [3] Šitum, Željko, Žilić, Tihomir, Essert, Mario, High speed solenoid valves in pneumatic servo applications, FSB, 2007.
- [4] Šurina, Tugomir, Automatska regulacija, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [5] Galović, Antun, Termodinamika 1, Tehnička knjiga, Zagreb, 1994.
- [6] Bevanda, Jurica, Regulacija pneumatskog cilindra primjenom elektromagnetskih dvopoložajnih ventila, FSB, Zagreb, 2005.